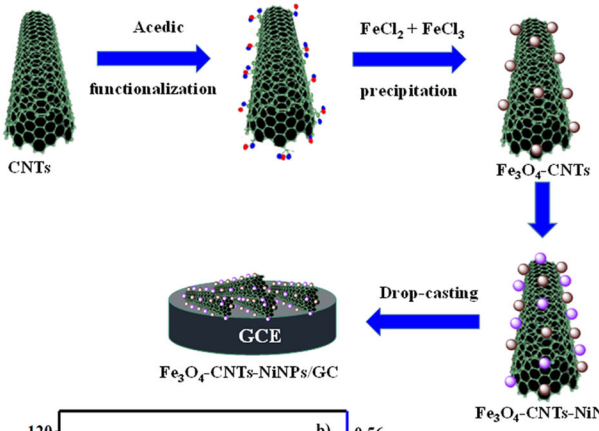
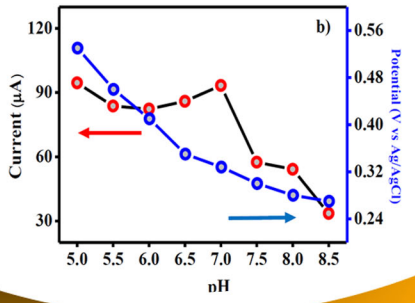






ISSN 2586-9256 (Print)
ISSN 2697-410X (Online)

JSSE Journal of Science and Science Education

วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา

ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 (ก.ค. – ธ.ค. 2562)
Vol. 2, No. 2 (Jul. – Dec. 2019)

FACULTY OF SCIENCE
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
https://www.tci-thaijo.org/index.php/JSSE

คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา
Journal of Science and Science Education (JSSE)

ISSN 2586-9256 (Print)
ISSN 2697-410X (Online)

เจ้าของ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สำนักงาน
งานส่งเสริมการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
85 ถนนสถลมาร์ค ตำบลเมืองศรีไค อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
โทรศัพท์ 045-353401 ต่อ 4425
โทรสาร 045-353422
Email: jsse.sci.ubu@gmail.com หรือ saksri.s@ubu.ac.th หรือ sura.s@ubu.ac.th

พิมพ์ที่
โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
85 ถนนสถลมาร์ค ตำบลเมืองศรีไค อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
วันที่พิมพ์ 30 ธันวาคม 2562

ข้อคิดเห็นในบทความของวารสารนี้เป็นทัศนะของผู้เขียน
กองบรรณาธิการของวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

วัตถุประสงค์และขอบเขตของวารสาร

วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา (Journal of Science and Science Education: JSSE) หมายเลข ISSN 2586-9256 เป็นวารสารที่จัดทำโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่บทความวิจัย (Research articles) หรือบทความวิชาการ (Review articles) ทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์ทุกสาขา (เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา จุลชีววิทยา วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณิตศาสตร์ สถิติ คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ) และด้านวิทยาศาสตร์ศึกษา ซึ่งหมายรวมถึงเทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์ศึกษา และคณิตศาสตร์ศึกษา ทั้งบทความภาษาไทยและบทความภาษาอังกฤษ โดยลักษณะของบทความที่จะนำเสนอเพื่อขอลงตีพิมพ์ในวารสารนี้จะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่เป็นองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย และต้องเป็นงานที่ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และทุกบทความจะต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องทางวิชาการจากคณะผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องในแต่ละสาขาวิชา (Peer Review) อย่างน้อย 2 ท่าน ทั้งนี้ วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษามีกำหนดเผยแพร่บทความปีละ 2 ฉบับหรือเล่ม โดยเล่มที่ 1 เป็นเผยแพร่บทความระหว่างเดือนมกราคม – มิถุนายน และเล่มที่ 2 เผยแพร่บทความระหว่าง กรกฎาคม – ธันวาคม ในกรณีที่มีกิจกรรมหรือโอกาสพิเศษของคณะวิทยาศาสตร์และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ทางกองบรรณาธิการอาจจะมีการพิจารณาเผยแพร่ฉบับเพิ่มเติม (Supplementary Issue) นอกเหนือจากฉบับปกติเป็นรายกรณีไป

ประเภทผลงานที่ตีพิมพ์

1. บทความผลงานวิจัย (Research Articles) เป็นผลงานที่เตรียมจากข้อมูลที่ผู้เขียนหรือคณะผู้เขียนได้ค้นคว้าวิจัยด้วยตัวเอง

2. บทความวิชาการ (Academic Articles) อาจแยกเป็นบทความปริทัศน์ (Review articles) บทความทางเทคนิค (Technical articles) เรียบเรียงจากการสืบค้น ตรวจสอบเอกสารวิชาการในสาขานั้นๆ และบทความพิเศษ (Special articles) เสนอความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน

กำหนดออก

เล่มที่ 1 มกราคม – มิถุนายน ของทุกปี
เล่มที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม ของทุกปี

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา

เพื่อให้การจัดทำวารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งเป็นวารสารสำหรับเผยแพร่ผลงานทางวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา ของอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ บุคลากร ตลอดจนผู้สนใจทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เป็นไปด้วยความเรียบร้อย มีประสิทธิภาพเกิดประสิทธิผล วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีจึงมีที่ปรึกษาบรรณาธิการและกองบรรณาธิการ ดังนี้

ที่ปรึกษาวารสาร คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองคณบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศักดิ์ศรี สุภาษร

ผู้ช่วยบรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุระ วุฒิพรหม

กองบรรณาธิการจากภายนอกมหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์วิชัย ริ้วตระกูล	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศาสตราจารย์ประนอม จันทรโณทัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์สันติ แม้นศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์วินิช พรมอารักษ์	สถาบันวิทยสิริเมธี
รองศาสตราจารย์ธีรวัฒน์ ประกอบผล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ชาตรี ฝ่ายคำตา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิวัฒน์ ศรีสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรีฑา แก้วคง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นินนาท์ จันทร์สูรย์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิดา รักกะเปา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัดตาวัน นาใจแก้ว	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

กองบรรณาธิการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รองศาสตราจารย์ศิริพร จึงสุทธิวงษ์	ภาควิชาเคมี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์มะลิวรรณ อมตธงไชย	ภาควิชาเคมี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานต์ตะรัตน์ วุฒิเสลา	ภาควิชาเคมี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาพร พรไตร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ช่อทิพย์ กัณฑโชติ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสงค์สม ปุณยอุปพัทธ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรศักดิ์ สุขบท	ภาควิชาฟิสิกส์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุดม ทิพราช	ภาควิชาฟิสิกส์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพจน์ สีบุตร	ภาควิชาคณิตศาสตร์ สถิติ และคอมพิวเตอร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วงกต ศรีอุไร	ภาควิชาคณิตศาสตร์ สถิติ และคอมพิวเตอร์

ฝ่ายจัดการวารสาร

นางสาวอมรรัตน์ วะสุรีย์ นายนัฐพงษ์ สืบสุข นายกมล คำพิบูลย์ และนางสาวจิราภรณ์ ทองสุด

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับบทความ

ทาง JSSE ได้ดำเนินการปรับรูปแบบของการเขียนเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษตามระบบ APA ตั้งแต่วารสารปีที่ 2 เล่มที่ 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2562) ซึ่งเป็นฉบับหน้าเป็นต้นไป โดยเปิดรับบทความวิจัยและบทความวิชาการทั้งภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ต้นฉบับบทความประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนบทคัดย่อ และส่วนเนื้อเรื่อง มีความยาวรวมกันไม่เกิน 16 หน้า ทั้งนี้ ถ้าบทความใดมีความยาวมากกว่า 16 หน้า ทางกองบรรณาธิการจะเป็นผู้พิจารณาตามความเหมาะสมอีกครั้ง โดยจัดพิมพ์ต้นฉบับบทความด้วยโปรแกรม Microsoft Word 2003 - 2016 ใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK สำหรับหัวเรื่องให้ใช้ตัวหนาขนาด 18 point ชื่อผู้เขียน ขนาด 14 point สถาบันต้นสังกัดของผู้เขียนขนาด 12 point ส่วนของเนื้อหาขนาด 14 point และให้ตั้งค่าหน้ากระดาษเป็นขนาด A4 (8.5 x 11 นิ้ว) และพิมพ์โดยเว้นระยะจากขอบกระดาษด้านบน ด้านขวา และด้านล่าง ด้านละ 1 นิ้ว ส่วนด้านซ้ายเว้นระยะเป็น 1.25 นิ้ว จัดเป็นคอลัมน์เดียว ระยะห่างระหว่างบรรทัดเป็น single space โดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนบทคัดย่อ

บทคัดย่อประกอบด้วยชื่อเรื่อง (Title) ของคณะผู้วิจัย (Authors) ชื่อสถาบัน และเนื้อหา(Body) พร้อมคำสำคัญ (Keywords) โดยชื่อเรื่อง ความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด ให้ใช้ตัวพิมพ์ใหญ่ ยกเว้นคำนำหน้านาม (article) คำบุพบท (proposition) และคำสันธาน (conjunction) ให้พิมพ์เป็นตัวพิมพ์เล็ก ชื่อคณะผู้วิจัย พิมพ์ด้วยตัวอักษรขนาด 14 point ระบุเฉพาะชื่อและนามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้านามหรือคุณวุฒิ และใส่ดอกจัน (asterisk, *) หลังนามสกุลของผู้เขียนหลักหรือผู้ประสานงาน (corresponding author) สำหรับภาษาไทยให้เว้นวรรค 2 เคาะระหว่างชื่อผู้วิจัย และผู้วิจัยคนสุดท้ายให้ใส่ "และ" นำหน้าโดยไม่ต้องเว้นวรรค และสำหรับภาษาอังกฤษให้ใส่จุลภาค (comma) หลังนามสกุล ยกเว้นคนสุดท้ายให้นำหน้าด้วย "and" และไม่ต้องใส่จุลภาคหน้า "and" ชื่อสถาบันขึ้นบรรทัดใหม่ พิมพ์ด้วยอักษรขนาด 12 point หากมีมากกว่า 1 สถาบัน ให้ใช้ตัวเลขยก (superscript) กำกับหน้าชื่อสถาบันและหลังชื่อผู้วิจัยให้ตรงกัน อีเมลของผู้เขียนหลักหรือผู้ประสานงานพิมพ์บรรทัดใหม่ใต้ชื่อสถาบันด้วยตัวอักษรขนาด 12 point เนื้อหาในบทคัดย่อควรครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา เช่น วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลและอภิปรายผล และคำสำคัญ ให้ขึ้นบรรทัดใหม่ และมีจำนวนอย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ โดยใช้คำที่สื่อความหมายในการค้นอย่างชัดเจน

ส่วนเนื้อเรื่อง

เนื้อเรื่อง ประกอบด้วยบทนำ (Introduction) วิธีดำเนินการวิจัย (Research Method) ผลการวิจัย (Results) อภิปรายผล (Discussion) สรุปผล (Conclusion) กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) และเอกสารอ้างอิง (References) สำหรับบทความวิชาการอาจจะมีรูปแบบการนำเสนอหรือหัวข้อที่แตกต่างออกไปตามความเหมาะสม ทั้งนี้รายละเอียดของบทความวิจัยมีดังนี้

1) บทนำ เป็นส่วนที่อธิบายถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาในการวิจัยหรือการศึกษา ตลอดจนสรุปผลการทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างกระชับเพื่อส่งเสริมให้ที่มาของงานวิจัยสำคัญและชัดเจนมากขึ้น

2) วัตถุประสงค์การวิจัย อาจจะเลือกนำเสนอในรูปแบบของคำถามวิจัยหรือสมมติฐานการวิจัยเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยเป็นการนำเสนอสิ่งที่ต้องการศึกษาให้ชัดเจน

3) วิธีดำเนินการวิจัย เป็นการอธิบายวิธีดำเนินการวิจัยซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบและประเภทของการวิจัยที่มีรายละเอียดแตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสม

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล เป็นการนำเสนอผลจากการศึกษาที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และวิธีดำเนินการวิจัยของการวิจัย ควรนำเสนออย่างตรงประเด็นและอภิปรายผลควบคู่ไปกับผลการวิจัยในแต่ละส่วน โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ หรือเปรียบเทียบกับหลักการหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

5) สรุปผล เป็นการนำเสนอสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษาหรือการวิจัยอย่างกระชับและเข้าใจได้ง่าย ควรมีการให้ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัยหรือการศึกษาเพิ่มเติมเข้าไปด้วย

6) กิตติกรรมประกาศ เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการศึกษา หน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุนหรือช่วยเหลือในการศึกษา

7) เอกสารอ้างอิง เป็นการเขียนรายการเอกสารที่ใช้ในการอ้างอิงในส่วนของเนื้อหาทั้งหมด โดยให้ยึดรูปแบบ APA (American Psychological Association) โดยเขียนบรรณานุกรมหรือเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษทั้งหมด โปรดดูคำอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของเอกสารอ้างอิง เอกสารอ้างอิงแต่ละรายการให้พิมพ์ต่อกันยาวจนตกบรรทัดเอง (ใช้การเคาะ space bar ตามความเหมาะสม) **แต่ห้ามเคาะ enter เพื่อตัดบรรทัด** ทั้งนี้ เอกสารอ้างอิงทุกรายการต้องเขียนระบบการอ้างอิงแบบ APA (American Psychological Association) เป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น แต่ต้องระบุภาษาที่ตีพิมพ์ไว้ในวงเล็บหลังชื่อบทความ ยกเว้นบทความภาษาอังกฤษที่ไม่ต้องระบุภาษาไว้ในวงเล็บหลังชื่อบทความ กรุณาศึกษาตัวอย่างการเขียนรายการเอกสารอ้างอิงจากตัวอย่างและคำอธิบายดังต่อไปนี้

บทความภาษาอังกฤษ

Supasorn, S. and Promarak, V. (2015). Implementation of 5E inquiry incorporated with analogy learning approach to enhance conceptual understanding of chemical reaction rate for grade 11 students. **Chemistry Education Research and Practice**, 16(1), 121-132.

บทความภาษาไทย

สุภาพร พรไตร และโรสลีนา อาแวหามะ. (2561). การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่องการถ่ายทอดยีนที่อยู่บนโครโมโซมเพศด้วยกิจกรรมการลงมือปฏิบัติบนฐานการสืบเสาะวิทยาศาสตร์. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 1(1), 38-48.

เขียนรายการอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษได้ดังนี้

Porntrai, S. and Awaehama, S. (2018). Developing learning achievement on sex-linked gene inheritance using a science inquiry-based hands-on activity (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 1(1), 38-48.

บทความภาษาไทย

ฉัตรชฎา ติงสะ อารีรัตน์ ใจกล้า สุภาพ ตาเมือง และศักดิ์ศรี สุภาษร. (2561). ผลสัมฤทธิ์และความสามารถในการแก้ปัญหา เรื่อง สมบัติและปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากการเรียนรู้แบบสืบเสาะผสมผสานกับการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 1(1), 97-108.

เขียนรายการอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษได้ดังนี้

Tingsa, C., Jaigla, A., Tamuang, S. and Supasorn, S. (2018). Twelfth Grade students' achievement and problem-solving ability on properties and reactions of organic compounds from learning by using inquiry incorporated with problem-based learning (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 1(1), 97-108.

คำแนะนำในการเขียนเอกสารอ้างอิง

วารสารนี้ใช้รูปแบบ APA ในการเขียนบรรณานุกรมหรือเอกสารอ้างอิง ซึ่งเป็นรูปแบบที่เป็นที่นิยมใช้ในสาขาวิชา จิตวิทยา การศึกษา และสาขาสังคมศาสตร์อื่นๆ การอ้างอิงมีข้อกำหนดตามแหล่งที่มาของเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิง และมีลำดับอักษรเรียงตามพยัญชนะ A B C ตามลำดับ

การอ้างอิงจากบทความในรายงานการประชุมวิชาการ

Author Name. (Year). Article or chapter title. In Editor Name (Ed. or Eds. if applicable), **Proceedings of _____** (pp. page-page). Date (if applicable). City: Publisher.

ตัวอย่างบทความภาษาอังกฤษ

Supasorn, S. (2010). Inquiry-based experiments to enhance students' conceptual understanding of organic acid-base extraction and purification. **Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2010** (pp. 180-183). January 21-23, 2010. Ubon Ratchathani: Ubon Ratchathani University.

ตัวอย่างบทความภาษาไทย

ฮิกมะฮ์ อาแวกะจิ และศักดิ์ศรี สุภาษร. (2558). การพัฒนาความเข้าใจมโนมติวิทยาศาสตร์ เรื่องสมดุลเคมี ด้วยวัฏจักรการเรียนรู้แบบสืบเสาะ 5 ขั้น ผสมผสานกับเทคนิคทำนาย-สังเกต-อธิบายในขั้นขยายความรู้ สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5. **รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ม.อบ. วิจัย ครั้งที่ 9** (หน้า 388-398). วันที่ 2-3 กรกฎาคม 2558. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

ให้เขียนรายการอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษได้ดังนี้

A-waekaji, H. and Supasorn, S. (2015). Development of scientific conceptual understanding of chemical equilibrium by using 5E inquiry learning cycle integrated with predict-observe-explain in the elaboration step for grade-11 students (in Thai). **Proceedings of 9th Ubon Ratchathani University Research Conference** (pp. 388-398). July 2–3, 2015. Ubon Ratchathani: Ubon Ratchathani University.

การอ้างอิงจากบทความในหนังสือพิมพ์

Author Name. (Year, Month Date). Article title. **Newspaper Name**. p. page.

ตัวอย่าง

Di Rado, A. (1995, March 15). Trekking through college: Classes explore modern society using the world of Star trek. **Los AngelesTimes**, p. A3.

การอ้างอิงจากหนังสือ

Author Name. (Year). **Textbook title**. City: Publisher.

ตัวอย่าง

Okuda, M. and Okuda, D. (1993). **Star trek chronology: The history of the future**. New York: Pocket Books.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

การอ้างอิงจากบท/ตอนในหนังสือ

Author Name. (Year). Article or chapter title. In Editor Name (Ed. or Eds. (if applicable)), **Textbook Title** (pp. page-page). City: Publisher.

ตัวอย่าง

James, N. E. (1988). Two sides of paradise: The Eden myth according to Kirk and Spock. In D. Palumbo (Ed.), **Spectrum of the fantastic** (pp. 219-223). Westport, CT: Greenwood.

การอ้างอิงจากบทความในหนังสือประเภทสารานุกรม

Author Name. (Year). Article title. In **Encyclopedia Name** (Vol. No., pp. page-page), **Textbook Title** (pp. page-page). City: Publisher.

ตัวอย่าง

Sturgeon, T. (1995). Science fiction. In **The encyclopedia Americana** (Vol. 24, pp. 390-392). Danbury, CT: Grolier.

การอ้างอิงจากเว็บไซต์

Author Name. (Year). Title. Retrieved Month Date, Year, from **Website Name**: URL

ตัวอย่างเว็บไซต์ภาษาอังกฤษ

Chapman, K. and Turner, K. (2018). The most important village in chemistry. Retrieved October 8, 2017, from **Education in Chemistry**: https://eic.rsc.org/feature/the-most-important-village-in-chemistry/3009670.article

ตัวอย่างเว็บไซต์ภาษาไทย

วิจารณ์ พานิช. (2562). มหาวิทยาลัยแห่งอนาคต. สืบค้นเมื่อ 8 มิถุนายน 2562. จาก **GoToKnow**: https://www.gotoknow.org/posts/285169

เขียนรายการอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษได้ดังนี้

Panich, V. (2019). University of the future (in Thai). Retrieved June 8, 2019. from **GoToKnow**: https://www.gotoknow.org/posts/661810

ศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน

http://www.ams.cmu.ac.th/lib/administrator/paper/APA%206th%20New.pdf

ดาวน์โหลดไฟล์เทมเพลทบทความได้ใน

https://drive.google.com/open?id=13ODZ6TaSzzXZV6ElmwxHwyBYQ17ynZQb

ถ้อยแถลงบรรณาธิการ

ปัจจุบันนี้ นักวิชาการหรือผู้ทำงานในสังคมวิชาการส่วนใหญ่มีภารกิจสำคัญหลายอย่าง และหนึ่งในภารกิจเหล่านั้น คือ การเผยแพร่ผลงานวิชาการในวารสารวิชาการหรือการประชุมวิชาการที่มีการกลั่นกรองผลงานโดยผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) เพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นระหว่างนักวิชาการด้วยกันเองและเพื่อเป็นการเผยแพร่ให้บุคคลทั่วไปที่สนใจได้อ่านและศึกษาตามความสนใจของแต่ละคน สำหรับในระบบการศึกษานั้น การเผยแพร่และการอ่านผลงานวิชาการนับเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาคุณภาพการศึกษาของประเทศ ในกรณีที่อ่านบทความแล้วเกิดความเห็นที่คล้อยตามหรือเกิดแนวคิดในการทำวิจัยที่คล้ายคลึงหรือใกล้เคียงกัน ผู้อ่านก็จะนำบทความนั้นไปอ้างอิงเพื่อต่อยอดหรือใช้เป็นฐานในการทำวิจัยของตนเองต่อไป ในกรณีที่อ่านแล้วเกิดความคิดเห็นที่แตกต่างหรือมีแนวคิดว่าสามารถทำวิจัยในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปน่าจะได้ผลที่ดีขึ้นหรือได้ผลวิจัยที่น่าสนใจเช่นกัน ผู้อ่านก็จะนำบทความวิจัยนั้นมาเป็นแนวคิดในการประยุกต์งานวิจัยของตนเองให้มีความน่าสนใจและมีประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการมากขึ้น ทั้งนี้ ผู้เขียนต้องพึงระวังว่า การอ้างอิงผลงานวิชาการเป็นเรื่องที่ต้องใส่ใจเป็นอย่างยิ่งและต้องอ้างอิงอย่างมีวิจารณญาณและมีจริยธรรม ทั้งนี้ ผู้เขียนจะต้องพิจารณาประเด็นเหล่านี้อย่างถี่ถ้วนก่อนส่งมารับการพิจารณาเผยแพร่ในวารสารฯ เพื่อป้องกันการคัดลอกผลงานวิชาการ (plagiarism) ทั้งที่ตั้งใจและไม่ตั้งใจได้ ทั้งนี้ กองบรรณาธิการของวารสารฯ ได้มีการตรวจสอบบทความอย่างเคร่งครัดเพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนจากหลักวิชาการ การคัดลอกผลงานวิชาการ หรือการกระทำที่ผิดต่อจริยธรรมการวิจัย

ทางคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้เล็งเห็นความสำคัญข้างต้น จึงได้จัดทำวารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา ขึ้นมาเพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเผยแพร่ผลงานวิชาการทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และด้านวิทยาศาสตร์ศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งวารสารด้านวิทยาศาสตร์ศึกษาโดยตรงในประเทศไทยยังมีจำนวนที่จำกัด ทางกองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฯ นี้จะเป็นทางเลือกหนึ่งในการเผยแพร่ผลงานวิชาการของผู้เขียนทุกท่าน โดยวารสารฉบับนี้เป็นวารสารปีที่ 2 เล่มที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2562 ประกอบด้วยบทความทั้งหมด 6 เรื่อง จำแนกเป็นบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ 3 เรื่อง บทความวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ 2 เรื่อง และบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ศึกษา 1 เรื่อง

กองบรรณาธิการวารสารฯ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาในการประเมินบทความและให้ข้อเสนอแนะที่มีค่าเพื่อทำให้บทความเหล่านี้มีความน่าสนใจและมีประโยชน์ต่อวงวิชาการมากขึ้น ทั้งนี้ ขอเชิญชวนนักวิจัยและนักวิชาการ ครูอาจารย์ นิสิตหรือนักศึกษา นักเรียน และผู้สนใจส่งบทความวิจัย บทความวิชาการ บทความวิทยานิพนธ์ หรือบทความโครงงาน มาเผยแพร่ในวารสารฯ สุดท้ายนี้ ทางกองบรรณาธิการวารสารฯ จะรักษามาตรฐานคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพของวารสารฯ อย่างต่อเนื่องเท่าที่จะทำได้ และขออนุญาตปฏิเสธการเผยแพร่บทความที่ไม่ตรงตามวัตถุประสงค์หรือบทความมีรูปแบบต้นฉบับไม่ถูกต้องโดยไม่ต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ

อนึ่ง ทางกองบรรณาธิการวารสารฯ ได้ปรับรูปแบบของการเขียนเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษตามระบบ APA ทั้งหมด (รายการที่เป็นภาษาไทยก็ต้องเขียนอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษ) ตั้งแต่วารสารปีที่ 2 เล่มที่ 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2562) เป็นต้นไป



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ศรี สุภาษร)
หัวหน้ากองบรรณาธิการวารสารฯ

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

สารบัญ

	หน้า
วัตถุประสงค์และขอบเขตของวารสาร	ข
กองบรรณาธิการ	ค
คำแนะนำสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับบทความ	ง
ถ้อยแถลงบรรณาธิการ	ซ
บทความวิจัยทางวิทยาศาสตร์ (Research Articles – Science)	
1) การพัฒนาซัลไฟต์เคมิคัลเซนเซอร์โดยการดัดแปรขั้วไฟฟ้าชนิดกลาสซีคาร์บอนด้วยอนุภาคนิกเกิล-แมกนีไทต์นาโนสำหรับใช้ในตัวอย่างอาหาร นงค์เยาว์ นนทวงษ์ และมะลิวรรณ อมตธงไชย*	90 – 101
2) ลักษณะทางจุลภาคของพืชสมุนไพรพิกุลและเดือยไก่ของเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอก อำภาภรณ์ สุดโททอง และช่อทิพย์ กัณฑโชติ*	102 – 115
3) การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียม ไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า อ้อฤทัย ใจบุญ* วุฒิชัย พรมวงศ์ วิภาดา สุวรรณไตรย์ และวรางคณา วังคะฮาด	116 – 126
บทความวิชาการทางวิทยาศาสตร์ (Academic Articles – Science)	
4) การประยุกต์สไปลน์กำลังสามเพื่อประมาณค่าอินทิกรัลจำกัดเขต สุพจน์ สีบุตร* และพัชรี วงษาสนธิ์	127 – 136
5) การใช้เลขสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์ สุพจน์ สีบุตร* และพัชรี วงษาสนธิ์	137 – 144
บทความวิจัยทางวิทยาศาสตร์ศึกษา (Research Articles – Science Education)	
6) การพัฒนาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่อง อัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL ปิยะดา ลื่นกลาง พรพิทักษ์ เห็มบาสัตย์ และวรรณพล พิมพะสาลี*	145 – 153
ดัชนีผู้เขียน	154

บทความวิจัย

การพัฒนาซัลไฟต์เคมิคัลเซนเซอร์โดยการดัดแปรขั้วไฟฟ้าชนิดกลาสซีคาร์บอนด้วยอนุภาคนิกเกิล-แมกนีไทต์นาโนสำหรับใช้ในตัวอย่างอาหาร

นงค์เยาว์ นนทวงษ์[1] และมะลิวรรณ อมตธงไชย[1,2,*]

[1]หลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

[2]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

**Email: maliwan.a@ubu.ac.th หรือ amaliwan@gmail.com*

รับบทความ: 24 มิถุนายน 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 10 กันยายน 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาเคมิคัลเซนเซอร์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่มีความจำเพาะและสภาพไวสูง เคมิคัลเซนเซอร์พัฒนาขึ้นโดยอาศัยการดัดแปรขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนด้วยวัสดุเชิงประกอบของแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และอนุภาคนิกเกิลขนาดนาโนตกแต่งบนท่อนาโนคาร์บอน (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs) อนุภาคแมกนีไทต์ขนาดนาโนถูกบรรจุอยู่บนผิวหน้าของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม ส่วนอนุภาคนิกเกิลขนาดนาโน (NiNPs) เตรียมขึ้นโดยการรีดิวซ์นิกเกิลคลอไรด์ด้วยไฮดราซีนไฮเดรท จากนั้นนำไปตกแต่งบน Fe_3O_4-CNTs โดยกระบวนการโซนิเคท เคมิคัลเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC) ถูกนำไปใช้สำหรับตรวจวัดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ (SO_3^{2-}) ด้วยเทคนิค ลิเนียร์สวีฟ โวลแทมเมทรีในสารละลายอิเล็กโตรไลต์เกื้อหนุน ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7.0 ผลการทดลองพบว่าซัลไฟต์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้า +0.38 โวลต์ ค่ากระแสออกซิเดชันจากสารละลายซัลไฟต์มีช่วงการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรงในช่วง 0.1 ถึง 10 มิลลิโมลาร์ มีสภาพไวเท่ากับ 12.75 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิโมลาร์ ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดเท่ากับ 28 ไมโครโมลาร์ (S/N = 3) ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเก็บไว้ได้นานถึง 3 สัปดาห์ที่อุณหภูมิห้อง มีสภาพไว มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดที่ดี และขั้นตอนการเตรียมไม่ยุ่งยาก นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดซัลไฟต์ในตัวอย่างไวน์ และอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แมกนีไทต์ คาร์บอนนาโนทิวป์ อนุภาคนิกเกิลขนาดนาโน ซัลไฟต์ เคมิคัลเซนเซอร์

อ้างอิงบทความนี้

นงค์เยาว์ นนทวงษ์ และมะลิวรรณ อมตธงไชย. (2562). การพัฒนาซัลไฟต์เคมิคัลเซนเซอร์โดยการดัดแปรขั้วไฟฟ้าชนิดกลาสซีคาร์บอนด้วยอนุภาคนิกเกิล-แมกนีไทต์นาโนสำหรับใช้ในตัวอย่างอาหาร. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 2(2), 90-101.

ลิขสิทธิ์โดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Research Article

Development of sulfite sensor based on glassy carbon electrode modified with nickel-magnetite nanoparticles for food

Nongyao Nontawong[1] and Maliwan Amatatongchai[1,2,*]

[1]Graduate Programs in Chemistry, Faculty of Science, Ubonratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

[2]Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubonratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

** Email: maliwan.a@ubu.ac.th or amaliwan@gmail.com*

Received <24 June 2019>; Accepted <10 September 2019>

Abstract

This work presented the development of a highly sensitive and selective electrochemical sensor for determination of sulfite. The sensor was developed based on modified glassy carbon electrode with magnetite (Fe_3O_4) and nickel nanoparticles decorated on carbon nanotubes (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs). Fe_3O_4 nanoparticles were in situ loaded on the surface of carboxylated multi-walled carbon nanotubes (CNTs-COOH) by a chemical co-precipitation procedure. Nickel nanoparticles (NiNPs) were prepared through reducing nickel chloride by hydrazine hydrate and then decorated on Fe_3O_4-CNTs using ultra-sonication. Chemical sensor was fabricated using a glassy carbon (GC) coated with Fe_3O_4-CNTs-NiNPs composites film. This developed chemical sensor (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC) was applied to study the electrochemical oxidation of sulfite by using linear sweep voltammetry in 0.1 M phosphate buffer pH 7.0 as supporting electrolyte. The oxidation of sulfite was found at +0.38 V. The sulfite oxidation currents varied linearly with the concentration of sulfite from was 0.1 – 10 mM (r^2 = 0.995) with the sensitivity of 12.75 μA.mM^{-1}. The limit of detection was 28 μM (S/N = 3). The storage stability of Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC was up to 3 weeks at room temperature. The developed sensor provided a high sensitivity, acceptable selectivity and simples of preparation. Furthermore, we successfully applied the sensor to detect sulfite in wine and food samples.

Keywords: Magnetite, carbon nanotubes, nickel nanoparticles, sulfite, chemical sensor

Cite this article:

Nontawong, N. and Amatatongchai, M. (2019). Development of Sulfite Sensor Based on Glassy Carbon Electrode Modified with Nickel-Magnetite Nanoparticles for Food (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 2(2), 90-101.

ลิขสิทธิ์โดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทนำ

ซัลไฟต์ (sulfite) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) เกลือซัลไฟต์ เกลือโซเดียมและโพแทสเซียมของไบซัลไฟต์ อาจเรียกว่า sulfiting agent ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร สารกลุ่มซัลไฟต์ โดยทั่วไปจะใช้เป็นสารกันเสียที่มีประสิทธิภาพสูง ช่วยยับยั้งการเจริญของยีสต์ รา และแบคทีเรีย เช่น ใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในการทำไวน์และเบียร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารกันหืน ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลใช้ในอาหารที่เป็นผักผลไม้ และผลิตภัณฑ์จำพวกแป้ง เช่น วุ้นเส้น เส้นหมี่ และก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามระดับของซัลไฟต์ในอาหารต้องมีปริมาณตามกฎกระทรวงสาธารณสุขกำหนดนับตั้งแต่ถูกค้นพบว่าบางระดับความเข้มข้นสามารถทำให้เกิดอาการภูมิแพ้ในคนได้ สำหรับผู้ที่แพ้สารซัลไฟต์อย่างรุนแรง หรือผู้ป่วยโรคหอบหืดถ้าได้รับสารซัลไฟต์ในปริมาณมาก อาการอาจรุนแรงถึงขั้นหมดสติ และเสียชีวิตได้ (Satienperakul, Phongdong and Liawruangrath, 2010; Amatatongchai et al., 2015) สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ออกกฎหมายในปี ค.ศ. 1986 ให้มีการติดฉลากผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของซัลไฟต์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg L^{-1}) ในอาหารหรือเครื่องดื่ม (Bahmani et al., 2010; Theisen et al., 2010; Yilmaz and Somer, 2007) ดังนั้นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟต์ที่มีความถูกต้อง แม่นยำ ในตัวอย่างอาหารและเครื่องดื่มจึงมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัดซัลไฟต์ ได้แก่ spectrophotometry (Hassan, Hamza and Mohamed, 2006; Tzanavaras, Thiakouli and Themelis, 2009) chemiluminescene (Bonifcio and Coichev, 2004; Rawa, Chawla and Pundir, 2011) capillary electrophoresis (Jankovskiene, Daunoravicius and Padarauskas, 2001) เป็นต้น ซึ่งในวิธีการเหล่านี้เครื่องมือมีราคาแพง การเตรียมตัวอย่างยุ่งยาก ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวัด ดังนั้นการตรวจวัดซัลไฟต์ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากให้สภาพไวในการตรวจวัดสูง การเตรียมตัวอย่างไม่ซับซ้อน มีการตอบสนองที่รวดเร็ว และเครื่องมือมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับวิธีทั่วไป (Dadamos and Teixeira, 2009; Garcia et al., 2005; Zhou, Yang and Sun, 2008) การพัฒนาซัลไฟต์ไบโอเซนเซอร์โดยอาศัยเอนไซม์ซัลไฟต์ออกซิเดส (SOx) ตรึงลงบนวัสดุขนาดนาโนโดยอาศัยเอนไซม์ SOx ในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ซัลไฟต์ (SO_3^{2-}) เป็นซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งการตรวจวัดซัลไฟต์ด้วยวิธีนี้มีสภาพไว และความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดสูง (Abass, Hart and Cowell, 2000; Sroysee et al., 2016) แต่อย่างไรก็ตามไบโอเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นยังมีขีดจำกัดคือเอนไซม์ที่ใช้มีราคาแพง กระบวนการตรึงเอนไซม์ยุ่งยาก มีขีดจำกัดในการใช้งานและการเก็บรักษา ได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช และความแรงของไอออนและที่สำคัญคือประสิทธิภาพของไบโอเซนเซอร์มักขึ้นกับความเสถียรของเอนไซม์ (Wang et al., 2002; Fatoni et al., 2013) เพื่อพัฒนาซัลไฟต์เซนเซอร์จากข้อจำกัดของไบโอเซนเซอร์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงนำมาสู่การพัฒนาเซนเซอร์แบบไม่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งช่วยเพิ่มสภาพไวในการตรวจวัด มีระยะเวลาในการตอบสนองที่รวดเร็ว มีความสามารถในการทำซ้ำที่ดี มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอกที่ดี

ในปัจจุบันวัสดุขนาดนาโนเช่น คาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) และวัสดุโลหะขนาดนาโนเมตรถูกนำมาประยุกต์ใช้ในส่วนของเซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์ คาร์บอนนาโนทิวป์มีโครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอนชนิด sp^2 เชื่อมต่อกันในลักษณะเป็นแผ่นที่ม้วนเข้าหากันเป็นท่อซึ่งสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยัง ¶-electron ได้ดี มีสมบัติคล้ายแท่งโลหะ สารกึ่งตัวนำ และตัวนำยิ่งยวด ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี (Iijima, 1991) นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจาก มีน้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวสูง และทนต่อความร้อนสูงรวมทั้งทนต่อกรด-เบส มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง (Merkoi et al., 2005; Gavalas et al., 2004; Lin, Cui and Ye, 2005) ผลวิจัยแสดงให้เห็นว่า CNTs มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าได้ดี และช่วยลดสิ่งปนเปื้อนบนขั้วไฟฟ้าได้ (Kul et al., 2013; Wang, Musameh and Lin, 2003)

วัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากมีสมบัติเป็นแม่เหล็กแบบซุปเปอร์พารา (Superparamagnetic) (Puangmali, 2013) ซึ่งเป็นสมบัติแม่เหล็กที่ไม่เสถียร ไม่มีอำนาจแม่เหล็กตกค้าง และมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเพิ่มความสามารถทางเคมีไฟฟ้าของเคมิคัลเซนเซอร์ และไบโอเซนเซอร์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าได้ดี มีความสามารถในการถ่ายโอนมวลสูง มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง (Welch and Compton, 2006) ดังนั้นในปัจจุบันวัสดุแม่เหล็กขนาดนาโนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Fe_3O_4 จึงนิยมศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในการตรึงโมเลกุลทางชีวภาพ และเอนไซม์สำหรับการพัฒนาเซนเซอร์ซึ่งจะช่วยเพิ่มความจำเพาะเจาะจง (selectivity) และความว่องไว (sensitivity) ของอุปกรณ์ตรวจวัดได้ (Teymourian, Salimi and Hallaj, 2013; Kaushik et al., 2008; Wang et al., 2007)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาซัลไฟต์เคมิคัลเซนเซอร์ที่มีสภาพไว (sensitivity) ความจำเพาะเจาะจง (selectivity) และความเสถียรสูง (stability) สูง เพื่อใช้หาปริมาณซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหาร โดยอาศัยการดัดแปรขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนด้วยวัสดุลูกผสมของอนุภาคแมกนีไทต์ และนิกเกิลขนาดนาโนตกแต่งบนท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs)

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

ซึ่งอนุภาคแมกนีไทต์ถูกสังเคราะห์แบบขั้นตอนเดียวบรรจุลงบนผิวหน้าของท่อนาโนคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชัน คาร์บอกซิลิกแอซิด (CNTs-COOH) ผ่านกระบวนการตกตะกอนร่วม (chemical co-precipitation) จากนั้นนำนิกเกิลขนาดนาโนที่เตรียมได้จากกระบวนการรีดิวซ์นิกเกิลคลอไรด์ ด้วยไฮดราซีนไฮเดรต มาตกแต่งลงบน Fe_3O_4-CNTs ด้วยกระบวนการโซนิเคทหรือการสั่นด้วยคลื่นเสียง เคลือบสารละลายแขวนลอยดังกล่าวลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอน (GC) จะได้ขั้วไฟฟ้า (Fe_3O_4-CNT-NiNPs/GC) จากนั้นนำเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิควิเคราะห์แบบลิเนียร์สวีฟโวลแทมเมทรีในการตรวจหาปริมาณซัลไฟต์ ซัลไฟต์เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีสภาพไว และมีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดที่ดี กระบวนการสังเคราะห์ง่าย รวดเร็ว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณในตัวอย่างอาหารและเครื่องดื่มได้อย่างถูกต้องแม่นยำเมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

อุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย เครื่องโพเทนชิโอสเตท รุ่น EA 161, e-Corder รุ่น 210 (บริษัท eDAQ, Australia) ระบบ 3 ขั้วไฟฟ้า คือขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ชนิดกลาสซีคาร์บอน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร), ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) และขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary electrode) ชนิดลวดแพลทินัม (Pt) (บริษัท CH Instruments, USA.)

สารเคมี

โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3), (Sigma-Aldrich), คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes; CNT, บริสุทธิ์ 95%), (NanoLab), นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2$), (ACROS ORGANICS), ไฮดราซีนไฮเดรต ($N_2H_4{\cdot}H_2O$), (Carlo Erba), ไดเมธิลฟอร์- มานไมน์ (DMF), เฟอร์รัสคลอไรด์ ($FeCl_2{\cdot}4H_2O$) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3{\cdot}6H_2O$), (Carlo Erba), ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เตรียมจากโซเดียมไดไฮโดรเจนซัลเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($Na_2HPO_4{\cdot}H_2O$), (Carlo Erba)

การสังเคราะห์วัสดุลูกผสมของอนุภาคแมกนีไทต์และ นิกเกิลขนาดนาโนตกแต่งบนท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs)

1) การสังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโนนิกเกิล (NiNPs)

อนุภาคขนาดนาโนนิกเกิลถูกสังเคราะห์ผ่านกระบวนการรีดักชันของนิกเกิลคลอไรด์ด้วยไฮดราซีนไฮเดรต ด้วยการดัดแปลงตามวิธีการสังเคราะห์ของ Wu et al. (2012) นำนิกเกิลคลอไรด์ 0.952 กรัม และไฮดราซีนไฮเดรต 5.0 กรัม ละลายในเอทิลีนไกลคอล 395 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตรลงไปในสารละลายผสมภายใต้การกวน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความร้อน 60 องศาเซลเซียส จะได้อนุภาคขนาดนาโนสีดำของนิกเกิล จากนั้นล้างด้วยเอทานอลและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบคาร์บอนนาโนทิวบ์และแมกนีไทต์ (Fe_3O_4-CNTs)

วัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-MWCNTs ถูกเตรียมผ่านกระบวนการตกตะกอนร่วม ดัดแปลงจาก Teymourian (2013) ชั่ง 10 มิลลิกรัม ของ CNTs เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร นำไปโซนิเคทเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเติม 15 มิลลิกรัมของ $FeCl_3$ $6H_2O$ กวนอย่างรุนแรง 600 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติม 20 มิลลิกรัมของ $FeCl_2{\cdot}4H_2O$ ในสภาวะที่มีการกวน และอยู่ภายใต้การเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหยดสารละลายแอมโมเนียอย่างช้าๆ ลงในสารละลายผสม ภายใน 1 ชั่วโมง ให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยาต่อ 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำไปเซนติฟิวส์และล้างด้วยเอทานอล และน้ำ DI 3 ครั้ง ตามลำดับ นำของแข็งที่ได้ทำให้แห้งในโถดูดความชื้นจะได้วัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs

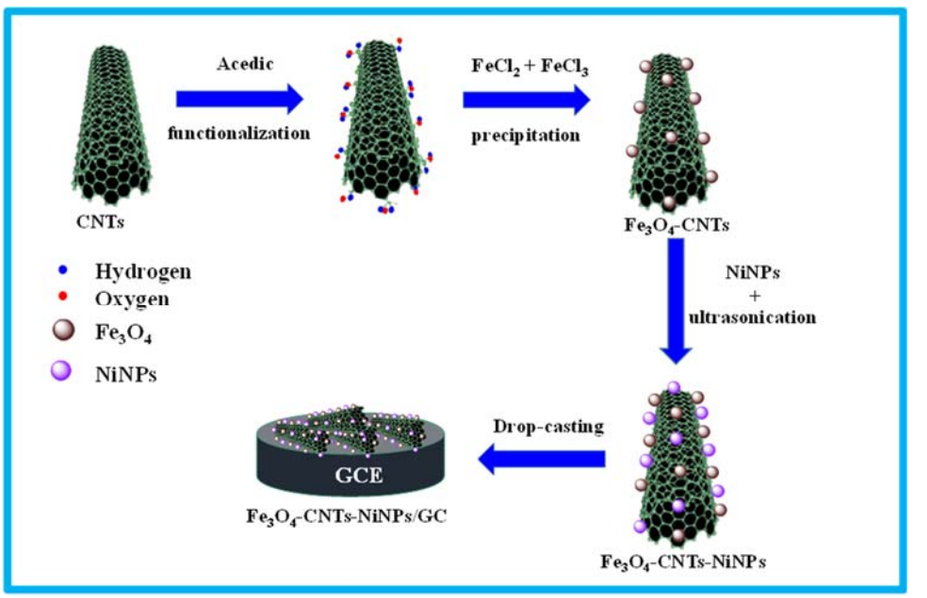
3) ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs

ชั่ง NiNPs มา 2 มิลลิกรัม และวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs 2 มิลลิกรัม จากนั้นปิเปตสารละลาย 1% DMF ปริมาตร 1 มิลลิลิตร sonicate ด้วยเครื่อง ultrasonic sonicator เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารแขวนลอยสีดำของวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs

4) ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC

ขัดขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนด้วยผงอะลูมินา ขนาด 1, 0.3 และ 0.05 ไมครอน จากนั้นล้างขั้วไฟฟ้าด้วยน้ำและนำไปโซนิเคท เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำ 4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ของวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ที่เตรียมได้จากข้างต้นดรอปลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ทำความสะอาดแล้วปริมาตร 40 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จะได้ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วย Fe_3O_4-CNTs-NiNPs (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC) ดัง

แสดงในภาพที่ 1 จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปตรวจวัดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรีในสารละลาย 0.1 โมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7.0



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการสังเคราะห์และการเตรียมขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-MWCNT-NiNPs/GC

5) ขั้นตอนการทดลองของการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี Iodometric titration

เติมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจากการทำ standardization ความเข้มข้น 0.0025 โมลาร์ลงในบิวเรตขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ความเข้มข้น 0.00021 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร และสารสกัดตัวอย่าง ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ทำการไทเทรตจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน จากนั้นเติมน้ำแป้งซึ่งทำหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ในขั้นตอนนี้จะได้สารละลายสีน้ำเงินไทเทรตต่อจนได้สารละลายไม่มีสีเพื่อหาปริมาณไอโอดีนส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตเพื่อหาปริมาณไอโอดีนส่วนที่ทำปฏิกิริยากับซัลไฟต์และคำนวณเทียบกลับเพื่อหาปริมาณซัลไฟต์ บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ไปโดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

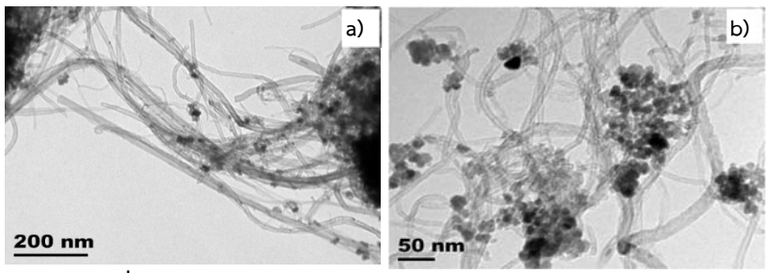
ผลการวิจัย

ผลการวิจัยในครั้งนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ขึ้น (Fe_3O_4-CNT-NiNPs)

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM) ในภาพที่ 2a) แสดงถึงโครงสร้างสัณฐานภายในของ Fe_3O_4-CNTs พบว่า CNTs มีลักษณะเป็นท่อสีเทาพื้นผิวถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคทรงกลมของ Fe_3O_4 จำนวนมาก และภาพที่ 2b) คือ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของ Fe_3O_4 และ NiNPs บนพื้นที่ผิวหน้าของ CNTs พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้นประมาณ 20.3 $\pm$ 1.6 nm (count = 50) ซึ่งกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Teymourian (2013) ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction Analysis (XRD) แสดงรายละเอียดดังงานวิจัย Nontawong et al. (2016)

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University



ภาพที่ 2 ภาพถ่าย TEM (a) Fe_3O_4-CNT และ (b) Fe_3O_4-CNT-NiNPs

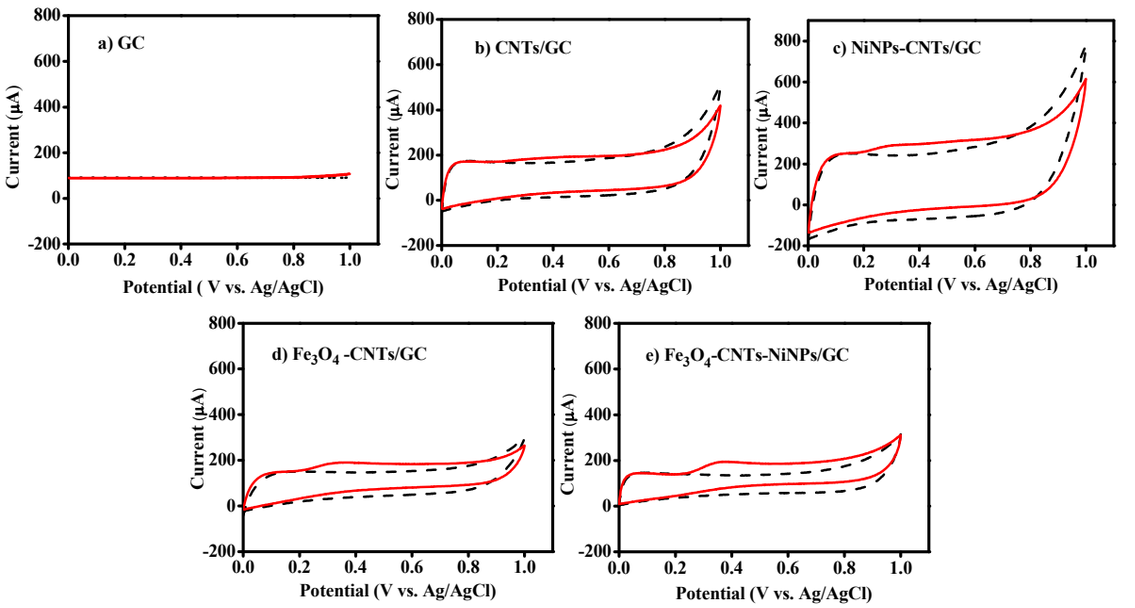
องค์ประกอบที่เหมาะสมของซัลไฟต์เคมิคัลเซนเซอร์

ในการศึกษาหาองค์ประกอบที่เหมาะสมของซัลไฟต์เซนเซอร์ ได้ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีเพื่อเปรียบเทียบและศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบต่างกันทั้ง 5 ชนิด (a-e) ได้แก่ a: ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอน (GC) b: ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs/GC) c: ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์ และนิกเกิลขนาดนาโน (NiNPs-CNTs/GC) d: ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยวัสดุเชิงประกอบคาร์บอนนาโนทิวบ์ และแมกนีไทต์ (Fe_3O_4-CNTs/GC) และ e: ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยแมกนีไทต์และ นิกเกิลขนาดนาโนตกแต่งบนท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC ผลการทดลองดังภาพที่ 2 ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (เส้นประ) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟต์ 4 มิลลิโมลาร์ (เส้นทึบ) พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์เกิดที่ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า 1 โวลต์เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า GC แต่เมื่อใช้ขั้ว CNTs/GC แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำลง (ประมาณ 0.40 โวลต์) ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า (c) CNTs-NiNPs/GC (d) Fe_3O_4-CNTs/GC และ (e) Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC แสดงแอโนดิกพีคที่ศักย์ไฟฟ้า 0.30, 0.32 และ 0.35 โวลต์ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุขนาดนาโนที่เคลือบบนพื้นผิวของ CNTs ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์เกิดที่ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำลง นอกจากนี้สัญญาณของกระแสแอโนดิกที่ได้จากขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC มีค่ามากที่สุด และแสดงพีคออกซิเดชันที่ชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุลูกผสม Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า และส่งเสริมให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารซัลไฟต์และผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์เกิดได้ดีขึ้น เนื่องจาก CNTs มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวสูง และมีความทนทานต่อปฏิกิริยาเคมี ส่วน Fe_3O_4 และ NiNPs มีบทบาทในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ให้เกิดได้ที่ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำลงซึ่งมีคุณสมบัติคือมีสภาพนำไฟฟ้าที่สูง มีพื้นที่ผิวมากทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น จากผลการทดลอง ขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC จึงเป็นขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟต์ กลไกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์สามารถแสดงดังสมการที่ 1

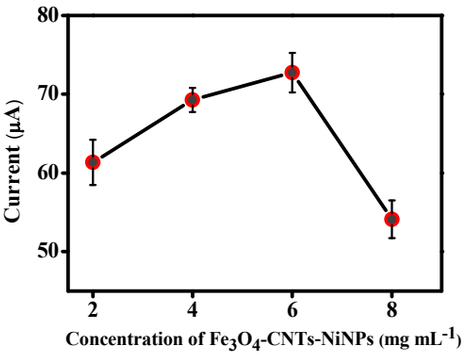
$$SO_3^{2-} + H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 2e^- + 2H^+ \qquad (1)$$

ผลของความเข้มข้น Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ที่เหมาะสม

ขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC ถูกนำไปตรวจวัดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์เพื่อหาความเข้มข้นของวัสดุเชิงประกอบ ที่เหมาะสม ในการศึกษาจะเตรียมขั้วไฟฟ้าที่ใช้ความเข้มข้นของวัสดุ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรในการดัดแปรขั้วไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งจากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs พบว่าการตอบสนองของกระแสฝั่งออกซิเดชันของซัลไฟต์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้วัสดุเชิงประกอบความเข้มข้นจาก 2.0 ถึง 6.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เนื่องจากปริมาณของ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ได้ดีขึ้น ความสามารถในการตรวจวัดเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 4) โดยปริมาณของวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ที่ 6.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ให้ค่ากระแสในการตรวจวัดสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้นมากกว่า 6.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำให้ค่ากระแสในการตรวจวัดลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการนำไฟฟ้าได้ดีของวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ทำให้ค่ากระแสพื้น (Background; B) มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ค่าสัญญาณ (Signal; S) จากค่ากระแสออกซิเดชันของ ซัลไฟต์เมื่อลบด้วยค่ากระแสพื้น (S/B) จึงมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sensri et al. (2011) ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นของวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ที่ 6.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งให้ค่ากระแสในการตรวจวัดที่สูงที่สุดใช้ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ (a) ขั้วไฟฟ้า GC (b) ขั้วไฟฟ้า CNTs/GC, (c) ขั้วไฟฟ้า NiNPs-CNTs/GC, (d) ขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs/GC และ (e) ขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7.0 (เส้นประ) และในสภาวะที่มีสารละลายมาตรฐานซัลไฟต์ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์ (เส้นทึบ) อัตราเร็วในการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อนาที

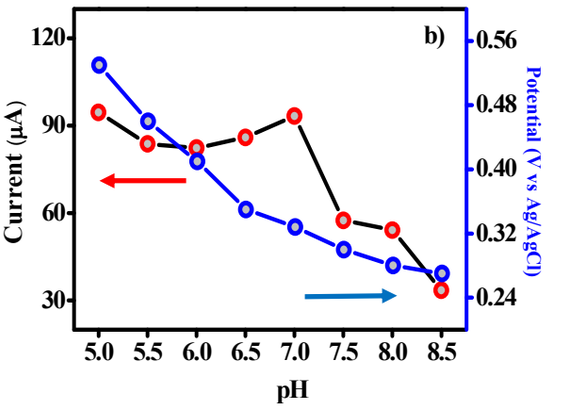


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ กับความเข้มข้นของวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ที่ใช้ในการดัดแปรขั้วไฟฟ้า GC (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC)

พีเอชของสารละลายอิเล็กโตรไลต์เกื้อหนุนฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม

ขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC ถูกนำไปตรวจวัดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่พีเอช 5.0 ถึง 8.5 ตามลำดับ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีดังภาพที่ 5a) เมื่อนำค่ากระแสฝั่งออกซิเดชัน ($i_{p,a}$) ที่ได้จากการวัดมาพล็อตกราฟกับพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5b) เส้นสีแดง (สเกลซ้าย) เมื่อพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เพิ่มขึ้นจากพีเอช 6.0 ถึง 8.5 ค่ากระแสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นที่พีเอช 7.0 ให้ค่ากระแสที่มีค่าสูงสุด เมื่อเพิ่มพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์สูงขึ้นมากกว่า 7.0 ค่ากระแสที่ได้นั้นลดลง ซึ่งที่พีเอชน้อยกว่าหรือมากกว่า 7 มีสภาพไวในการตรวจวัดลดลงเนื่องมาจากการเกิด hydration หรือ hydroxylation ของ Fe_3O_4 และ NiNPs บนขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ลดลงดังภาพที่ 5b) เส้นสีน้ำเงิน (สเกลซ้าย) ซึ่งจากผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amatatongchai et al. (2015) ที่พัฒนาซัลไฟต์เซนเซอร์ และพบว่าพีเอช 7.0 ให้ค่ากระแสของการวัดสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีสภาพไวในการตรวจวัดซัลไฟต์สูงที่สุดที่พีเอช 7.0 ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เท่ากับ 7.0 เป็นพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจวัด

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University



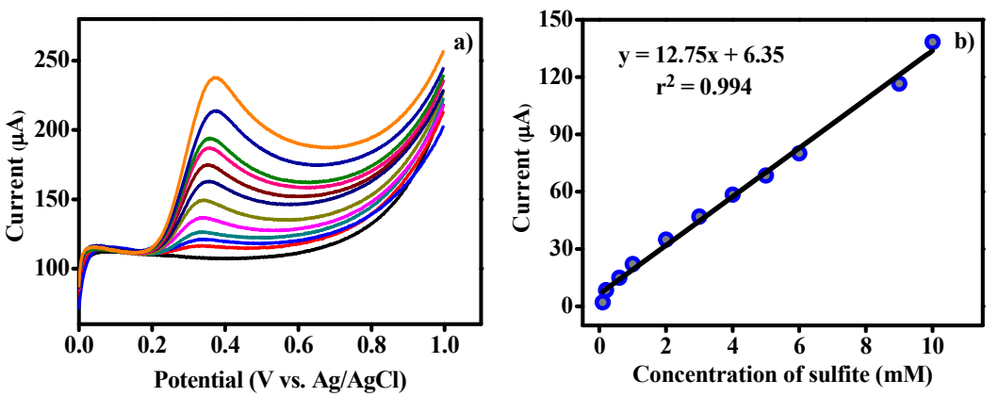
ภาพที่ 5 a) CVs ของขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปรด้วย Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC และ b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์กับศักย์ไฟฟ้าในการตรวจวัดค่าพีเอชของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (พีเอช 5.0 ถึง 8.5)

ศึกษาอัตราเร็วในการสแกน และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟต์

จากผลการศึกษาอัตราเร็วในการสแกนของขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปรด้วย Fe_3O_4-CNTs-NiNPs (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าเมื่ออัตราเร็วในการสแกนเพิ่มขึ้นค่าสัญญาณกระแสออกซิเดชันของซัลไฟต์เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่ากระแส (μA) พล็อตกับรากที่สองของอัตราเร็วในการสแกนในช่วง 0.01-0.09 โวลต์ต่อวินาที พบว่าให้สมการเส้นตรงเท่ากับ $I_{p,a}$ = 2362.20 $\mathbf{v}^{1/2}$ +21.27 (r^2 = 0.991) จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเป็นกระบวนการควบคุมด้วยการแพร่ของสารละลายไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC

ประสิทธิภาพของซัลไฟต์เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

ในการศึกษาคุณลักษณะของซัลไฟต์เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC) ด้วยเทคนิคลิเนียร์สวีฟโวลแทมเมตรีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สัญญาณที่ได้แสดงดังภาพที่ 6

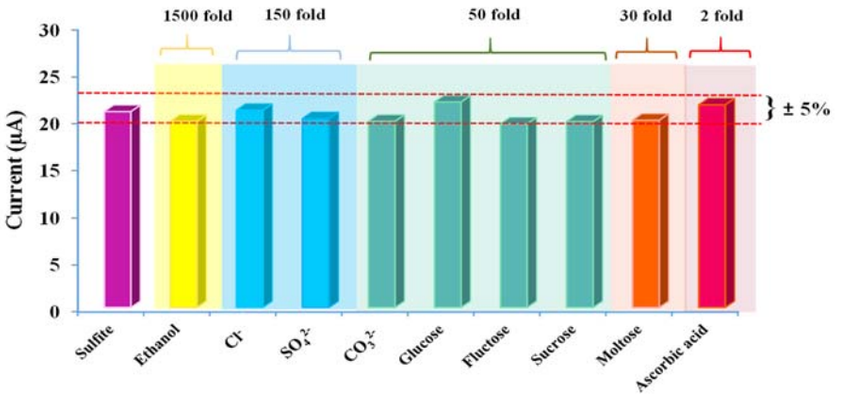


ภาพที่ 6 a) ลิเนียร์สวีฟ โวลแทมโมแกรม และ b) กราฟมาตรฐานและสมการเส้นตรง สำหรับการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานซัลไฟต์ (ความเข้มข้น: 0.1, 0.2, 0.6, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 และ 10 มิลลิโมลาร์) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

จากภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณการตอบสนองของแอโนดิกพีคเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของซัลไฟต์เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าสัญญาณกระแสแอโนดิกที่ยอดพีคมาพล็อตกับความเข้มข้นของซัลไฟต์ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรงของสารละลายมาตรฐาน ซัลไฟต์อยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.1 ถึง 10 มิลลิโมลาร์ (8.01 – 800.66 mg L^{-1}) ค่าความชันเท่ากับ 12.75 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิโมลาร์ โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง คือ y = 12.75x + 6.35 (r^2 = 0.994) ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (detection limit) มีค่าเท่ากับ 0.028 มิลลิโมลาร์ (S/N = 3) ซัลไฟต์เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีช่วงการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรงที่เหมาะสม และเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณซัลไฟต์ในเครื่องดื่ม และตัวอย่างอาหารได้

ศึกษาผลของตัวรบกวน

ในการศึกษาผลของตัวรบกวนที่มีผลต่อการวิเคราะห์ซัลไฟต์ด้วยเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคลีเนียร์สวีฟโวลแทมเมตรี ตัวรบกวนที่ศึกษาได้แก่ เอทานอล โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนต กลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส มอลโตส และกรดแอสคอร์บิก ที่ความเข้มข้นต่างๆ เติมสารละลายมาตรฐานซัลไฟต์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ จากนั้นเติมตัวรบกวนที่ความเข้มข้นต่างๆแล้วทำการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสจากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานซัลไฟต์ เทียบกับสัญญาณที่ได้จากการวัดสารละลายซัลไฟต์ที่มีตัวรบกวน ถ้าสัญญาณค่ากระแสมีค่าแตกต่างกันเกิน ±5% แสดงว่าตัวรบกวนที่ศึกษารบกวนต่อการตรวจวัดซัลไฟต์ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 7

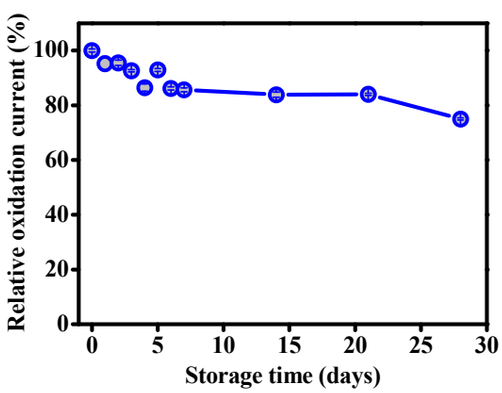


ภาพที่ 7 ผลการตรวจวัดตัวรบกวนที่ความเข้มข้นต่างๆเทียบกับการตรวจวัดซัลไฟต์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

ตัวรบกวนที่ทำการศึกษาทั้ง 9 ชนิด พบว่าสารประกอบ กลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส มอลโตส และเอทานอล และสารประกอบประเภทแอนไอออน ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนต ไม่มีผลรบกวนต่อการวิเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (ถึงแม้จะมีความเข้มข้นสูงถึง 30-1500 เท่าของสารละลายซัลไฟต์) ส่วน กรดแอสคอร์บิกรบกวนต่อการวิเคราะห์โดยให้ค่า Tolerance limit เท่ากับ 2 เท่าของความเข้มข้นซัลไฟต์ เนื่องจากเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย และมีศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันที่ใกล้เคียงกับซัลไฟต์ แต่อย่างไรก็ตามในการตรวจวัดซัลไฟต์ในตัวอย่างจริงได้ทำการเจือจางสารตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ และนอกจากนี้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ผักกาดดอง และกระเทียมดองไม่มีปริมาณของกรดแอสคอร์บิกเนื่องจากมีความว่องไวสูงต่อการสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการหมัก ซึ่งแสดงดังงานวิจัยของ Alfredo et al. (2004) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปรด้วยวัสดุเชิงประกอบ Fe_3O_4-CNTs-NiNPs ที่พัฒนาขึ้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัดซัลไฟต์สูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณซัลไฟต์ตัวอย่างไวน์ และอาหารได้โดยไม่มีการรบกวนจากตัวรบกวนต่างๆที่นำมาใช้ในการศึกษานี้

ศึกษาความเสถียรของซัลไฟต์เคมิคัลเซนเซอร์

ศึกษาความเสถียรของขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC โดยการเตรียมขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว และนำมาวัดค่ากระแสของซัลไฟต์ หลังจากเตรียมขั้วไฟฟ้าไว้เป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิ 25 °C



ภาพที่ 8 ความเสถียรของขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC ที่ระยะเวลาต่างๆในการเก็บรักษา (เก็บที่อุณหภูมิ 25 °C)

ผลการทดลองในภาพที่ 8 พบว่าขั้วไฟฟ้า Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC มีความเสถียรสูง โดยค่ากระแสออกซิเดชันของซัลไฟต์ที่ได้จากการวัดหลังจากเตรียมซัลไฟต์เซนเซอร์ไว้ 21 วันมีค่าร้อยละความสัมพันธ์ของค่ากระแสซัลไฟต์มีค่าใกล้เคียงกับ

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

ค่ากระแสเริ่มต้น (~84%) จากนั้นค่ากระแสลดลงเหลือประมาณ 75% หลังจากเก็บขั้วไฟฟ้าไว้ 28 วัน เมื่อเทียบกับค่ากระแสเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีความเสถียรที่ดีเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 21 วัน ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวตรวจวัดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟต์ได้ดี

การประยุกต์ใช้ซัลไฟต์เคมิคัลเซนเซอร์ในตัวอย่างจริง

เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs/GC) ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจริงโดยนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของซัลไฟต์ในตัวอย่างไวน์ (W-1, W-2 และW-3) สารสกัดจากผักกาดดอง (M-1, M-2 และ M-3) และกระเทียมดอง (P-1, P-2 และP-3) ตัวอย่างเหล่านี้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคลิเนียร์สวีฟโวลแทมเมทรีโดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์หาปริมาณของซัลไฟต์ในตัวอย่างไวน์ ผักกาดดอง และกระเทียมดอง ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (การไทเทรต) โดยผลลัพธ์วิเคราะห์ที่ได้จากวิธีที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐานมีค่าความแตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.28 ถึง 4.66% นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบทางสถิติ paired *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Miller and Miller, 2010) เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐาน ผลการทดลองพบว่าปริมาณของซัลไฟต์ที่ตรวจวัดในตัวอย่างไวน์ ผักกาดดอง และกระเทียมดอง จากทั้ง 2 วิธีนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (t_{cal} = 0.37, t_{table} = 4.30) แสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้มีความถูกต้องและสามารถวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟต์ในตัวอย่างจริงได้

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของซัลไฟต์ที่ตรวจพบในตัวอย่างเครื่องดื่ม และอาหารด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ได้จากเทคนิคไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

Samples	Developed method (mg L^{-1})	Iodometric method (mg L^{-1})	Relative error (%)
W-1	7.51±0.11	7.77±0.47	-3.35
W-2	14.59±0.38	14.55±0.95	+0.28
W-3	24.54±0.51	23.75±1.89	+3.33
M-1	21.03±0.25	21.28±3.28	-1.17
M-2	21.54±0.41	22.37±1.89	-3.71
M-3	24.33±1.08	24.56±3.28	-0.94
G-1	29.74±0.12	28.93±5.01	+2.80
G-2	31.43±0.37	30.03±3.79	+4.66
G-3	31.85±1.08	32.21±3.79	-1.12

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาซัลไฟต์เซนเซอร์แบบไม่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการดัดแปรขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนโดยอาศัยอนุภาคนิกเกิลขนาดนาโน นอกจากนี้ยังช่วยให้ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีสภาพไวในการตรวจวัดสูงและมีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดซัลไฟต์ โดยอาศัยอนุภาคแมกนีไทป์ และอนุภาคนิกเกิลขนาดนาโนตกแต่งบนคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs) ซึ่งอนุภาคแมกนีไทป์ถูกสังเคราะห์แบบ in situ บรรจุลงบนผิวหน้าของคาร์บอน นาโนทิวบ์ที่มีหมู่ฟังก์ชั่นคาร์บอกซิลิก แอซิด (CNTs-COOH) ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมทางเคมี (chemical co-precipitation) จากนั้นนำนิกเกิลขนาดนาโนที่เตรียมได้จากการรีดิวซ์นิกเกิลคลอไรด์ ด้วยไฮดราซีนไฮเดรท มาตกแต่งลงบน Fe_3O_4-CNTs ด้วยกระบวนการโซนิเคท และนำวัสดุขนาดนาโนที่สังเคราะห์ได้ (Fe_3O_4-CNTs-NiNPs) ดรอปลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอน จะได้ขั้วไฟฟ้า (Fe_3O_4-CNT-NiNPs/GC) ผลการทดลองด้วยเทคนิคลิเนียร์สวีฟ โวลแทมเมทรี พบว่าซัลไฟต์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้า +0.35 โวลต์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) นอกจากนี้ยังพบว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นค่ากระแสที่ได้มีการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรงต่อปริมาณของซัลไฟต์ที่เพิ่มขึ้นโดยสามารถตรวจวัดปริมาณซัลไฟต์ได้ในช่วง 0.1 ถึง 10 มิลลิโมลาร์ (r^2 = 0.994) และมีขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (Limit of Detection; LOD) เท่ากับ 0.028 มิลลิโมลาร์ (S/N=3) นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดซัลไฟต์ในตัวอย่างไวน์ ผักกาดดอง และกระเทียมดองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) และทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย สำหรับเงินทุนสนับสนุนการวิจัย และทุนการศึกษาของ นางสาวนงค์เยาว์ นนทวงษ์

เอกสารอ้างอิง

Abass, A.K. Hart, J.P. and Cowell, D. (2000). Development of an amperometric sulfite biosensor based on sulfite oxidase with cytochrome c, as electron acceptor, and a screen-printed transducer. **Sensors and Actuators B**, 62, 148–153.

Amatatongchai, M. and et al. (2015). Simple flow injection for determination of sulfite by amperometric detection using glassy carbon electrode modified with carbon nanotubes–PDDA–gold nanoparticles. **Talanta**, 133, 134-141.

Bahmani B. and et al. (2010). Development of an electrochemical sulfite biosensor by immobilization of sulfite oxidase on conducting polyaniline film. **Synthetic Metals**, 160(23-24), 2653-2657.

Bonifcio, R. L and Coichev, N. (2004). Chemiluminescent determination of sulfite traces based on the induced oxidation of Ni(II)/tetraglycine complex by oxygen in the presence of luminol: mechanistic considerations. **Analytica Chimica Acta**. 517(1-2), 125-130.

Dadamos, T. R. L. and Teixeira, M. F. S. (2009). Electrochemical sensor for sulfite determination based on a nanostructured copper-salen film modified electrode. **Electrochimica Acta,** 54(19), 4552-4558.

Fatoni, A., and et al. (2013). A highly stable oxygen-independent glucose biosensor based on a chitosan-albumin cryogel incorporated with carbon nanotubes and ferrocene. **Sensors and Actuators B**, 185, 725-734.

Garcia, T. and et al. (2005). Electrochemical sensor for sulfite determination based on iron hexacyanoferrate film modified electrodes. **Sensors and Actuators B**, 106(2), 803-809.

Gavalas, V. G. and et al. (2004). Carbon nanotube aqueous sol-gel composites: enzyme-friendly platforms for the development of stable biosensors. **Analytical Biochemistry**, 329(2), 247-252.

Hassan, S. S. M., Hamza, M. S. A. and Mohamed, A. H. K. (2006). A novel spectrophotometric method for batch and flow injection determination of sulfite in beverages. **Analytica Chimica Acta,** 570(2), 232-239.

Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, 354, 56–58.

Jankovskiene, G., Daunoravicius, Z. and Padarauskas, A. (2001). Capillary electrophoretic determination of sulfite using the zone-passing technique of in-capillary derivatization. **Journal of Chromatography A**, 934(1-2), 67-73.

Kaushik, A. and et al. (2008). Chitosan iron oxide nanobiocomposite based immunosensor for ochratoxin-A. **Analytical Communications**, 10(9), 1364-1368.

Kul, D., and et al. (2013). A novel amperometric sensor for ascorbic acid based on poly(Nile blue A) and functionalised multi-walled carbon nanotube modified electrodes. **Talanta**, 111, 76-84.

Lin, Y. Cui, X. and Ye, X. (2005). Electrocatalytic reactivity for oxygen reduction of palladium-modified carbon nanotubes synthesized in supercritical fluid. **Electrochemistry Communications**, 7(3), 267-274.

Merkoi, A. and et al. (2005). New materials for electrochemical sensing VI: Carbon nanotubes. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, 24(9), 826-838.

Miller, J. N. and Miller, J. C. (2010). **Statistics and Chemo metrics for Analytical Chemistry** (6th ed). Pearson Education Limited, Essex.

Montaño, A. and et al. (2004). Vitamin Content and Amino Acid Composition of Pickled Garlic Processed with and without Fermentation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 52 7324-7330.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Nontawong, N. and et al. (2016). Non-enzymatic glucose sensors for sensitive amperometric detection based on simple method of nickel nanoparticles decorated on magnetite carbon nanotubes modified glassy carbon electrode. **International journal of electrochemical science**, 12, 1362-1376.

Puangmali, T. (2013). Magnetic nanoparticles for drug targeting: A magic bullet for cancer therapy (in Thai). **KKU Science Journal**, 41(3), 607-620.

Rawa, L. R., Chawla, S. and Pundir, C. S. (2011). Polyphenol biosensor based on laccase immobilized onto silver nanoparticles/multiwalled carbon nanotube/ polyaniline gold electrode. **Analytical Biochemistry**, 419(2), 196-204.

Satienperakul, S., Phongdong, P. and Liawruangrath, S. (2010). Pervaporation flow injection analysis for the determination of sulphite in food samples utilising potassium permanganate–rhodamine B chemiluminescence detection. **Food Chemistry**, 121(3), 893-898.

Sensri, Y., Chairam, S., Nacapricha, D. and Amatatongchai, M. (2011). Development of a biosensor based on the matrix of carbon nanotubes-chitosan composite for laccase-catalyzed oxygen reduction (in Thai). **Burapha Science Journal**, 16(2), 40-50.

Sroysee, W. and et al. (2016). A sensitive and selective on-line amperometric sulfite biosensor using sulfite oxidase immobilized on a magnetite-gold-folate nanocomposite modified carbon-paste electrode. **Talanta**, 156-157, 154-162.

Teymourian, H. Salimi, A. and Hallaj, R. (2013). Low potential detection of NADH based on Fe_3O_4 nanoparticles/multiwalled carbon nanotubes composite: Fabrication of integrated dehydrogenase-based lactate biosensor. **Biosensors and Bioelectronics**, 33(1), 60-68.

Theisen, S. and et al. (2010). A fast and sensitive HPLC method for sulfite analysis in food based on a plant sulfite oxidase biosensor. **Biosensors and Bioelectronics**, 26(1), 175-181.

Tzanavaras, P. D., Thiakouli, E. and Themelis, D. G. (2009). Hybrid sequential injection flow injection manifold for the spectrophotometric determination of total sulfite in wines using o-phthalaldehyde and gas-diffusion. **Talanta**, 77(5), 1614-1619.

Wang, J. and et al. (2002). Oxygen independent poly(dimethylsiloxane)-based carbon-paste glucose. **Biosensors and Bioelectronics**, 17, 999-1003.

Wang, J. Musameh, M. and Lin, Y. (2003). Solubilization of Carbon Nanotubes by Nafion toward the Preparation of Amperometric Biosensors. **Journal of the American Chemical Society**, 125, 2408-2409.

Wang, Q. and et al. (2007). Room-temperature ionic liquids/multi-walled carbon nanotubes/chitosan composite electrode for electrochemical analysis of NADH. **Electrochimica Acta**, 52(24), 6630-6637.

Welch, C.M. and Compton, R.G. (2006). The use of nanoparticles in electroanalysis: a review. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, 384(3), 601-619**.**

Wu, X. and et al. (2012). Nickel nanoparticles prepared by hydrazine hydrate reduction and their application in supercapacitor. **Power Technology**, 224, 162-167.

Yilmaz, M. T. and Somer, G. (2007). Determination of trace sulfite by direct and indirect methods using differential pulse polarography. **Analytica Chimica Acta**, 603(1), 30-35.

Zhou, H., Yang, W. and Sun, C. (2008). Amperometric sulfite sensor based on multi-walled carbon nanotubes/ferrocene-branched chitosan composites. **Talanta**, 77(1), 366-371.

บทความวิจัย

ลักษณะทางจุลภาคของพืชสมุนไพรพิกุลและเดือยไก่ ของเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอก

อำภาภรณ์ สุดโททอง และ ช่อทิพย์ กัณฑโชติ*
ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 34190
**Email: chortip.k@ubu.ac.th*

รับบทความ: 6 พฤศจิกายน 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 26 ธันวาคม 2562

บทคัดย่อ

ศึกษาลักษณะทางจุลภาคเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอกของพืชสมุนไพรพิกุล (*Mimusops elengi* L.) และเดือยไก่ (*Madhuca thorelii* (Dubard) H.J.Lam) เพื่อใช้ประกอบการจัดทำข้อมูลทางจุลภาคในการกำหนดมาตรฐานยาสมุนไพรไทย ดำเนินการวิจัยตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 ถึง เดือนกันยายน พ.ศ. 2562 โดยสำรวจและเก็บตัวอย่างพืชในจังหวัดอุบลราชธานีและจังหวัดศรีสะเกษ จากนั้นนำเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอกมาตัดตามขวางย้อมด้วยซาฟรานินโอความเข้มข้น 1% ในน้ำ และศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบลักษณะสำคัญของเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอกของพืชทั้งสองชนิด ดังนี้ (1) มีเซลล์คอร์กในชั้นเพริเดิร์มเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (2) มีเซลล์น้ำยางในเปลือกไม้ (3) การกระจายตัวของเซลล์เวสเซลในเนื้อไม้เป็นแบบกระจาย (4) กลีบเลี้ยงมีไทรโคม (5) กลีบดอกมีเซลล์หลั่ง (6) ก้านชูเกสรเพศผู้มีมัดท่อลำเลียง 1 มัด (7) อับเรณูมี 4 พู (8) เรณูเป็นแบบรูซ้อนทับร่อง มี 3–4 ช่องเปิด ซึ่งลักษณะเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบเพิ่มเติมสำหรับการจัดทำข้อกำหนดมาตรฐานยาสมุนไพรไทยได้

คำสำคัญ: การตัดตามขวาง เดือยไก่ พิกุล พืชสมุนไพร ลักษณะทางจุลภาค

อ้างอิงบทความนี้
อำภาภรณ์ สุดโททอง และ ช่อทิพย์ กัณฑโชติ. (2562). ลักษณะทางจุลภาคของพืชสมุนไพรพิกุลและเดือยไก่ของเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอก. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 2(2), 102-115.

Research Article

Microscopical characteristics of medicinal plants, *Minusops elengi* L. and *Madhuca thorelii* (Dubard) H.J.Lam, based on bark, wood and flower

Ampaporn Sudtotong and Chortip Kantachot*

Department of Biological Sciences, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University 34190

**Email: chortip.k@ubu.ac.th*

Received <6 November 2019>; Accepted <26 December 2019>

Abstract

Microscopical characteristic study of two medicinal plants, *Minusops elengi* and *Madhuca thorelii* based on bark, wood and flower was investigated. The objective was to provide microscopical data of the standard database specify for Thai Herbal Pharmacopoeia. The research was carried out between August 2018 and September 2019. Plant materials were surveyed and collected in Ubon Ratchathani and Srisaket provinces. Transverse section of bark, wood and all floral parts was performed and stained with 1% Safranin O in water. Anatomical features were observed by a light microscopy. The results revealed that important characteristics of both species are (1) presence of rectangular cork cells in periderm, (2) presence of laticifer in bark, (3) diffuse–porous wood, (4) presence of trichomes at sepal, (5) presence of secretory cells in petal, (6) presence of one vascular bundle in filament, (7) anthers 4-celled and (8) 3-4 colporate pollen. These characteristic evidences are useful for the standard database of Thai Herbal Pharmacopoeia.

Keywords: Transverse section, *Madhuca thorelii*, *Mimusops elengi*, medicinal plant, microscopical characteristic study

Cite this article:

Sudtotong, A. and Kantachot, C. (2019). Microscopical characteristics of medicinal plants, *Minusops elengi* L. and *Madhuca thorelii* (Dubard) H. J. Lam, based on bark, wood and flower (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 2(2), 102-115.

ลิขสิทธิ์โดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทนำ

พิกุล (*Minusops elengi* L.) และเดือยไก่ (*Madhuca thorelii* (Dubard) H.J.Lam) จัดอยู่ในวงศ์พิกุล (Sapotaceae) ลักษณะสำคัญของวงศ์ คือ มีน้ำยางสีขาวในเกือบทุกส่วน ใบเดี่ยวเรียงเวียนสลับ เนื้อใบหนาและมันวาว มีหูใบที่หลุดร่วงง่าย ดอกช่อออกตามซอกใบ วงกลีบดอกเชื่อมติดกันและปลายกลีบแยก มีรังไข่แบบเหนือวงกลีบ ส่วนใหญ่มี 6 ช่อง (locule) แต่ละช่องมี 1 ออวุล เกสรเพศผู้เรียงสลับกับกลีบดอก บางชนิดพบเกสรเพศผู้ที่เป็นหมัน ผลเป็นแบบผลสดมี 1 ถึงหลายเมล็ด พืชทั้งสองชนิดมีลักษณะร่วมกัน คือ วงกลีบเลี้ยงเรียงเป็นสองชั้น ปลายของก้านใบไม่มีเกล็ดเล็ก และช่อดอกเป็นแบบกระจุก แต่ลักษณะที่แตกต่าง คือ พิกุลมีกลีบเลี้ยง 8 อัน ส่วนเดือยไก่มี 4 อัน หรือ พบน้อยที่มี 5 อัน (Chantaranothai, 2014) เนื่องจากพิกุลมีสรรพคุณทางยามากมาย เช่น ใช้เปลือกรักษาอาการเหงือกอักเสบ แก้ปากเปื่อย และแก้ปวดฟัน รักษาอาการท้องอืดและท้องเฟ้อ แก่นใช้บำรุงโลหิต รักษากลากและเกลื้อน กระพี้รักษาเกลื้อน และดอกแก้ท้องเสีย บำรุงหัวใจ แก้หอบ แก้เจ็บคอ ขับเสมหะ โรคทางเดินหายใจ และแก้ปวดเมื่อยตามร่างกาย นอกจากนี้ยังใช้ดอกพิกุลเป็นส่วนประกอบร่วมกับพืชชนิดอื่นในยาแผนไทยหรือยาแผนโบราณ เช่น ยาหอม ยาสตรีหลังคลอด ยาเขียว และยาบำรุงโลหิต เป็นต้น สำหรับเดือยไก่มีรายงานการใช้เป็นยาพื้นบ้านอีสานด้วยการนำแก่นหรือผลต้มน้ำดื่มเพื่อช่วยทำให้ชุ่มคอ แก้เส้นเอ็นตึง และแก้กระหายน้ำ และรากใช้รักษาอาการเคล็ดขัดยอก (Chuakul, Prathanturarug and Jenjittikul, 2000; National Drug System Development Committee, 2012; Forest and Plant Conservation Research Office Director, 2013, 2015; Office of the Permanent Secretary for Ministry of Natural Resources and Environment, 2007; Gami, Pathak and Parabia, 2012; Kaspo, 2014) สำหรับพืชวงศ์พิกุลในภาคตัดขวางของกิ่งหรือลำต้นอ่อนพบเซลล์หลั่งเซลล์น้ำยาง และผลึกในคอร์เท็กซ์และเนื้อเยื่อโฟลเอ็ม การกระจายของเซลล์เวสเซลในเนื้อไม้มีทั้งแบบเดี่ยวและแบบกลุ่ม และเนื้อเยื่อแนวรัศมีของไซเล็ม (xylem ray) มี 1–2 แถว (Metcalfe and Chalk, 1979) เนื้อไม้ของสกุลละมุดป่า (*Manilkara*) มีเวสเซลแบบกระจาย (diffuse–porous wood) ทั้งแบบแฝดและแบบกระจุก ประกอบด้วย 2–6 เซลล์ และเนื้อเยื่อแนวรัศมีของไซเล็มเรียง 1–2 แถว พบน้อยที่มี 3–4 แถว (Kukachka, 1981) ข้อมูลลักษณะทางจุลภาคของดอกพิกุลและผงยาในหนังสือตำรายาสมุนไพรไทย (Thai Herbal Pharmacopoeia) ของ Department of Medical Sciences (2018) และเปลือกไม้พิกุลจากงานวิจัยของ Kadam et al. (2012) ได้กล่าวไว้ว่ากลีบเลี้ยงและกลีบดอกมีเนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 2 ชั้น และ 1 ชั้น ตามลำดับ พบไทรโคมจำนวนมากที่กลีบเลี้ยงและมีสารโอลีโอเรซิน (olresin) กลีบดอกมีเนื้อเยื่อพื้นเป็นเซลล์พาเรงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยมถึงค่อนข้างกลม และผงยาพบไทรโคมแบบเซลล์เดียว (unicellular trichome) เรณูเป็นแบบรูซ้อนทับร่อง (colporate) มี 3–4 ช่องเปิด เซลล์ในชั้นคอร์กของเปลือกไม้รูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม เฟลโลเจนและเฟลโลเดิร์มแยกจากกันไม่ชัดเจน มีเม็ดแป้งและผลึกในชั้นคอร์เท็กซ์ รวมทั้งพบเซลล์สโตนและผลึกในผงยา นอกจากนี้ในการศึกษาทางจุลภาคของพืชสกุล *Madhuca* บางชนิดในประเทศอินเดีย ได้แก่ *Ma. longifolia* (L.) J.F.Macbr. และ *Ma. indica* J.F.Gmel. พบว่ากลีบดอกมีเนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เนื้อเยื่อพื้นประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างไม่แน่นอน อับเรณูมี 4 พู เอนโดทีเซียมเป็นรูปไข่ ลำต้นมีผิวเคลือบคิวทิน (cuticle) ชัดเจน และมีเนื้อเยื่อสเกลอเรงคิมาล้อมรอบมัดท่อลำเลียง (Khare, Kishore and Sharma, 2018; Moteriya et al., 2018)

ปัจจุบันการศึกษาลักษณะทางจุลภาค (microscopical characteristic study) ของพืชสมุนไพรเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอนุกรมวิธานและซิสเทมาติคส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของพืชสมุนไพรหรือเครื่องยาจากส่วนหรืออวัยวะที่นำมาใช้ประโยชน์โดยตรง ได้แก่ ราก ลำต้น ใบ ดอก ผล และ/หรือเมล็ด ซึ่งการนำเสนอผลการพิสูจน์เอกลักษณ์พืชจำเป็นต้องออกมาในรูปแบบของการบรรยายลักษณะรูปร่าง-การจัดเรียงตัวของเซลล์และเนื้อเยื่อ และสารประกอบที่อยู่ภายในเซลล์ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างทางกายวิภาคศาสตร์ และรายงานผลเป็นภาพถ่ายหรือภาพลายเส้นที่ระบุกำกับชนิดของเซลล์หรือเนื้อเยื่อนั้น ๆ (Bureau of Drug and Narcotic, Department of Medical Sciences, 2017) งานทางด้านจุลภาคถือเป็นข้อมูลสำคัญส่วนหนึ่งที่นำมาใช้จัดทำเป็นข้อมูลเพื่อกำหนดมาตรฐานยาสมุนไพรในตำรายามาตรฐานยาสมุนไพรไทย (Thai Herbal Pharmacopoeia, THP) โดยข้อกำหนดดังกล่าวต้องประกอบด้วยการตรวจสอบเอกลักษณ์ทางพฤกษศาสตร์

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

พฤกษเคมี ลักษณะทางมหภาคและจุลภาค และจัดทำโมโนกราฟของสมุนไพร (Bureau of Drug and Narcotic, 2017; Zollner and Schwarz, 2013) ข้อมูลตำรายาสมุนไพรของประเทศไทยเล่มล่าสุดจัดพิมพ์ขึ้นในปี พ.ศ. 2561 ประกอบด้วยรายละเอียดพืชสมุนไพรมากกว่า 160 ชนิด (Department of Medical Sciences, 2018) แต่อย่างไรก็ตามยังมีพืชสมุนไพรอีกหลายชนิดที่ยังไม่มีการจัดทำข้อมูลมาตรฐานหรือมีข้อมูลแต่ไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ รวมถึงพิกุลและเดือยไก่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีขอบเขตมุ่งเน้นศึกษาส่วนของดอก เปลือกไม้ และเนื้อไม้ ที่มีการนำมาใช้เป็นสมุนไพรหรือเป็นส่วนประกอบในเครื่องยาไทย

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาลักษณะทางจุลภาคของพิกุลและเดือยไก่จากเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอก สำหรับนำไปใช้ประกอบการจัดทำข้อมูลกำหนดมาตรฐานยาสมุนไพรไทย

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยลักษณะทางจุลภาคของพิกุลและเดือยไก่ มีขั้นตอนการศึกษา 2 ส่วน ดังนี้

1. การเก็บตัวอย่างและการระบุชนิดพืช

1.1 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายพันธุ์ของพืชจากหนังสือพรรณพฤกษชาติของประเทศไทย (Flora of Thailand) เล่มที่ 11 ฉบับที่ 4 และศึกษาตัวอย่างพรรณไม้แห้งในพิพิธภัณฑ์พืชภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.2 ออกสำรวจและเก็บตัวอย่างภาคสนามในจังหวัดอุบลราชธานีและศรีสะเกษ จากนั้นศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของดอกด้วยกล้องสเตอริโอ Olympus รุ่น SZ พร้อมทั้งตรวจระบุชนิดพืชจากรูปวิธานและคำบรรยายลักษณะทางพฤกษศาสตร์ตามงานวิจัยของ Chantaranothai (2014) ในหนังสือพรรณพฤกษชาติแห่งประเทศไทย

1.3 นำตัวอย่างที่ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จัดทำเป็นตัวอย่างพรรณไม้แห้งเพื่อการอ้างอิง (voucher specimen) และส่วนที่ 2 รักษาสภาพกิ่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12–20 มิลลิเมตร และดอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5–8 มิลลิเมตร ไว้ในแอลกอฮอล์ 70% เพื่อศึกษาลักษณะทางจุลภาคจากกายวิภาคศาสตร์ของเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอก โดยเก็บรักษาตัวอย่างทั้งสองส่วนไว้ที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รายละเอียดดังตารางในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเก็บรักษาตัวอย่างพิกุลและเดือยไก่

ชนิดพืช	หมายเลขผู้เก็บ	สถานที่เก็บ
1. *Mi. elengi* (พิกุล)	*A. Sudtotong* 01	อ. วารินชำราบ จ. อุบลราชธานี
	C. Kantachot 567	อ. กันทรลักษ์ จ. ศรีสะเกษ
2. *Ma. thorelii* (เดือยไก่)	*A. Sudtotong* 02	อ. ม่วงสามสิบ จ. อุบลราชธานี
	C. Kantachot 570	อ. กันทรลักษ์ จ. ศรีสะเกษ

2. การศึกษาลักษณะทางจุลภาค

2.1 นำตัวอย่างกิ่งและดอกที่ได้จากการรักษาสภาพในข้อ 1.3 มาตัดตามขวาง (transverse section) ด้วยใบมีดโกน เพื่อศึกษาลักษณะจุลภาคของเปลือกไม้ เนื้อไม้ กลีบเลี้ยง กลีบดอก เกสรเพศผู้ และเกสรเพศเมีย

2.2 แบ่งชิ้นตัวอย่างเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบประเภทสารเออร์แกสติก (ergastic substances) ที่สะสมภายในเซลล์ด้วยสารละลายไอโอดีน (iodine), สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 10%

(ferric chloride) สีนิวทรัลเรด (neutral black) และสีซูดานแบล็ค (sudan black) และส่วนที่ 2 ย้อมชิ้นตัวอย่างด้วยสีซาฟรานินโอ (safranin O) ความเข้มข้น 1% ที่ละลายในน้ำ นาน 3–5 นาที และผนึกสไลด์ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นจึงจัดทำเป็นสไลด์แบบกึ่งถาวรโดยใช้น้ำยาทาเล็บป้ายบริเวณขอบกระจกปิดสไลด์ทั้ง 4 ด้าน

2.3 นำสไลด์ส่วนที่ 2 มาศึกษาลักษณะจุลภาคพืชในภาคตัดขวางของเปลือกไม้ เนื้อไม้ และดอก และบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เชื่อมต่อกับกล้องดิจิทัล Canon รุ่น DS126271

ผลการวิจัย

การศึกษาลักษณะทางจุลภาคของพิกุลและเดือยไก่ในภาคตัดขวางของกิ่งและดอก (ตารางที่ 1 และภาพที่ 1–4) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ผลการวิจัยที่ได้เป็นดังนี้

1. กายวิภาคศาสตร์เปลือกไม้และเนื้อไม้

1.1 *Mi. elengi*

เปลือกไม้ ผิวด้านนอกสุดของเปลือกไม้มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน มีเซลล์น้ำยาง ชั้นเพริเดิร์มประกอบด้วยเซลล์คอร์กรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียงตัวเป็นระเบียบ 1–3 ชั้น เฟลโลเจนและเฟลโลเดิร์มแยกออกจากกันไม่ชัดเจน เฟลโลเดิร์มประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมาและเซลล์คอลเลงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยม มีเซลล์หลั่ง สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้ง แทนนิน ผลึกรูปปริซึม และลิพิด เนื้อเยื่อสเกลอเรงคิมาเรียงตัวเป็นระเบียบและพบเซลล์สโตนอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (ภาพที่ 1ก)

เนื้อไม้ มีการกระจายตัวของเวสเซลเป็นแบบกระจาย มีทั้งแบบเดี่ยว แบบแฝด และแบบกลุ่ม ประกอบด้วย 3–4 เซลล์ (ภาพที่ 1ค) เนื้อเยื่อแนวรัศมีของไซเล็มเรียง 1 แถว

1.2 *Ma. thorelii*

เปลือกไม้ ผิวด้านนอกสุดของเปลือกไม้มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน มีเซลล์น้ำยาง ชั้นเพริเดิร์มประกอบด้วยเซลล์คอร์กรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียงตัวเป็นระเบียบ 1–2 ชั้น เฟลโลเจนและเฟลโลเดิร์มแยกออกจากกันค่อนข้างชัดเจน เฟลโลเดิร์มประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างกลมและรีและเซลล์คอลเลงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยม สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้ง แทนนิน (ภาพที่ 1ข) และผลึกรูปปริซึม เนื้อเยื่อสเกลอเรงคิมาเรียงตัวเป็นระเบียบและไม่พบเซลล์สโตน

เนื้อไม้ มีการกระจายตัวของเวสเซลเป็นแบบกระจาย มีทั้งแบบเดี่ยว แบบแฝด และแบบกลุ่ม ประกอบด้วย 3–4 เซลล์ (ภาพที่ 1ง) เนื้อเยื่อแนวรัศมีของไซเล็มเรียง 1 แถว

2. กายวิภาคศาสตร์ดอก

2.1 *Mi. elengi*

กลีบเลี้ยง รูปเสี้ยวพระจันทร์ โค้งงอเข้าด้านใน ปลายกลีบเลี้ยงทั้งสองด้านแหลม *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีเนื้อเยื่อชั้นผิวทั้งด้านนอกและด้านในเรียงตัวด้านละ 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างค่อนข้างกลม กลีบเลี้ยงด้านนอกพบไทรโคมแบบขนเซลล์เดียวทั้งมีต่อม (glandular hair) และไม่มีต่อม (non-glandular hair) และขนหลายเซลล์รูปโล่ (peltate hair) กลีบเลี้ยงด้านในมีเนื้อเยื่อชั้นรองจากผิว 1–2 ชั้น *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างกลมและเซลล์คอลเลงคิมารูปร่างรี (ภาพที่ 2ก และ 2ค) มีเซลล์หลั่ง สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้ง (ภาพที่ 2ค) *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1–2 แถว

กลีบดอก แฉกกลีบดอก รูปทรงรี เหยียดตรง ปลายกลีบทั้งสองด้านแหลม (ภาพที่ 2จ) *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีเนื้อเยื่อชั้นผิวทั้งด้านนอกและด้านในเรียงตัวด้านละ 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างรี *ระบบเนื้อเยื่อพื้น* ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมาและเซลล์คอลเลงคิมารูปร่างกลม มีเซลล์หลั่ง สารเออร์แกสติกมีลิพิดและแทนนิน (ภาพที่ 2ช) *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1 แถว

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

โคนกลีบดอก เป็นวงแหวน (ภาพที่ 3ก) *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน เนื้อเยื่อชั้นผิวทั้งด้านนอกและด้านในเรียงตัวด้านละ 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างค่อนข้างกลมหรือกลม *ระบบเนื้อเยื่อพื้น* ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างรี มีเซลล์หลั่ง (ภาพที่ 3ค) *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1–3 แถว

เกสรเพศผู้ ก้านชูเกสรเพศผู้ รูปทรงรี *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน เนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างค่อนข้างกลม *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยมหรือค่อนข้างกลม *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง*มีมัดท่อลำเลียง 1 มัด อยู่ตรงกลาง (ภาพที่ 3จ) **อับเรณู**มี 4 พู *ระบบเนื้อเยื่อผิว* มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน เนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เอนโดทีเซียมเรียงตัว 1 ชั้น *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์คอลเลงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยม *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง*มีมัดท่อลำเลียง 1 มัด อยู่ตรงกลาง (ภาพที่ 3ช) เรณูแบบรูซ้อนทับร่อง มี 3–4 ช่องเปิด

เกสรเพศเมีย ก้านชูเกสรเพศเมีย รูปร่างกลม *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน เนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างค่อนข้างกลม *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์คอลเลงคิมาและพาเรงคิมารูปร่างกลม สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้งและแทนนิน *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงเป็น 1 วง และพบเซลล์เส้นใยแทรกอยู่ในมัดท่อลำเลียง (ภาพที่ 4ก) **รังไข่** พลาเซนตาแบบรอบแกนร่วม (axile placenta) และคาร์เพลมี 8 ช่อง *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีเนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบไทรโคมแบบขนต่อมเซลล์เดียว (ภาพที่ 4ค) *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างกลม สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้งและแทนนิน *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1 วง (ภาพที่ 4จ)

2.2 Ma. thorelii

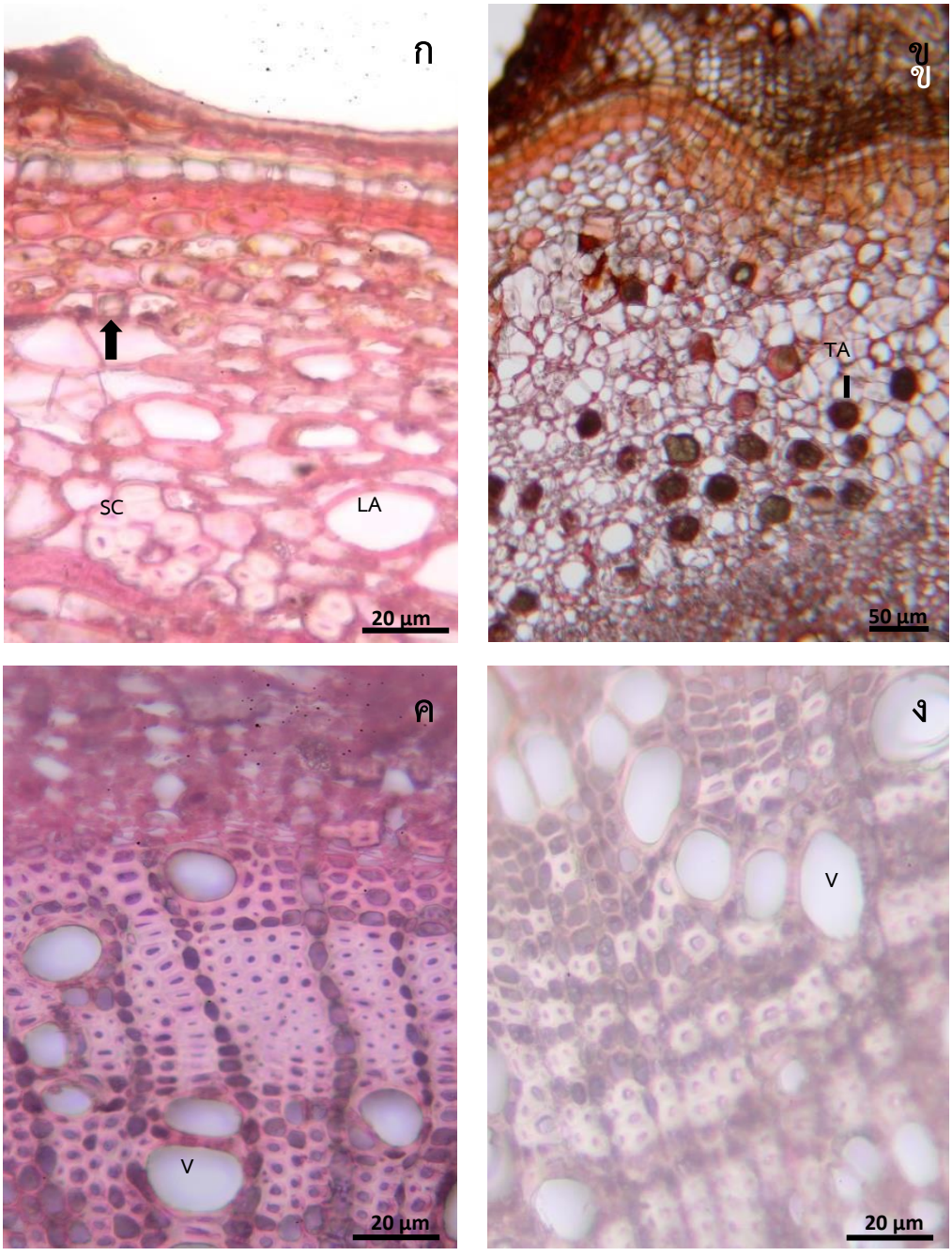
กลีบเลี้ยง รูปเสี้ยวพระจันทร์ โค้งงอเข้าด้านใน ปลายกลีบเลี้ยงทั้งสองด้านแหลม มีเนื้อเยื่อชั้นผิวทั้งด้านนอกและด้านในเรียงตัวด้านละ 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างค่อนข้างกลม กลีบเลี้ยงด้านนอกพบไทรโคมแบบขนเซลล์เดียวไม่มีต่อม กลีบเลี้ยงด้านในมีเนื้อเยื่อชั้นรองจากผิว 1 ชั้น *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยม (ภาพที่ 2ข) สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้ง (ภาพที่ 2ง) *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1 แถว

กลีบดอก แฉกกลีบดอก รูปทรงรี โค้งงอเข้าด้านใน ปลายกลีบด้านหนึ่งแหลมและอีกด้านมนถึงแหลม (ภาพที่ 2ฉ) *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีเนื้อเยื่อชั้นผิวทั้งด้านนอกและด้านในเรียงตัวด้านละ 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างกลม *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยม มีเซลล์หลั่ง สารเออร์แกสติกมีแทนนินและผลึกรูปปริซึม *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1 แถว **โคนกลีบดอก**เป็นวงแหวน (ภาพที่ 3ข) *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน เนื้อเยื่อชั้นผิวด้านนอกและด้านในเรียงตัวด้านละ 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างกลม *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างกลมกรือหลายเหลี่ยม มีเซลล์หลั่ง (ภาพที่ 3ง) *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1–2 แถว (ภาพที่ 3ฉ)

เกสรเพศผู้ ก้านชูเกสรเพศผู้ รูปร่างกลม *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน เนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างกลม *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยม มีเซลล์หลั่ง*ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง*มีมัดท่อลำเลียง 1 มัด อยู่ตรงกลาง (ภาพที่ 3ฉ) **อับเรณู**มี 4 พู *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีผิวเคลือบคิวทินชัดเจน เอนโดทีเซียมเรียงตัว 1 ชั้น *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างหลายเหลี่ยม *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง*มีมัดท่อลำเลียง 1 มัด อยู่ตรงกลาง (ภาพที่ 3ช) เรณูแบบรูซ้อนทับร่อง มี 3 ช่องเปิด

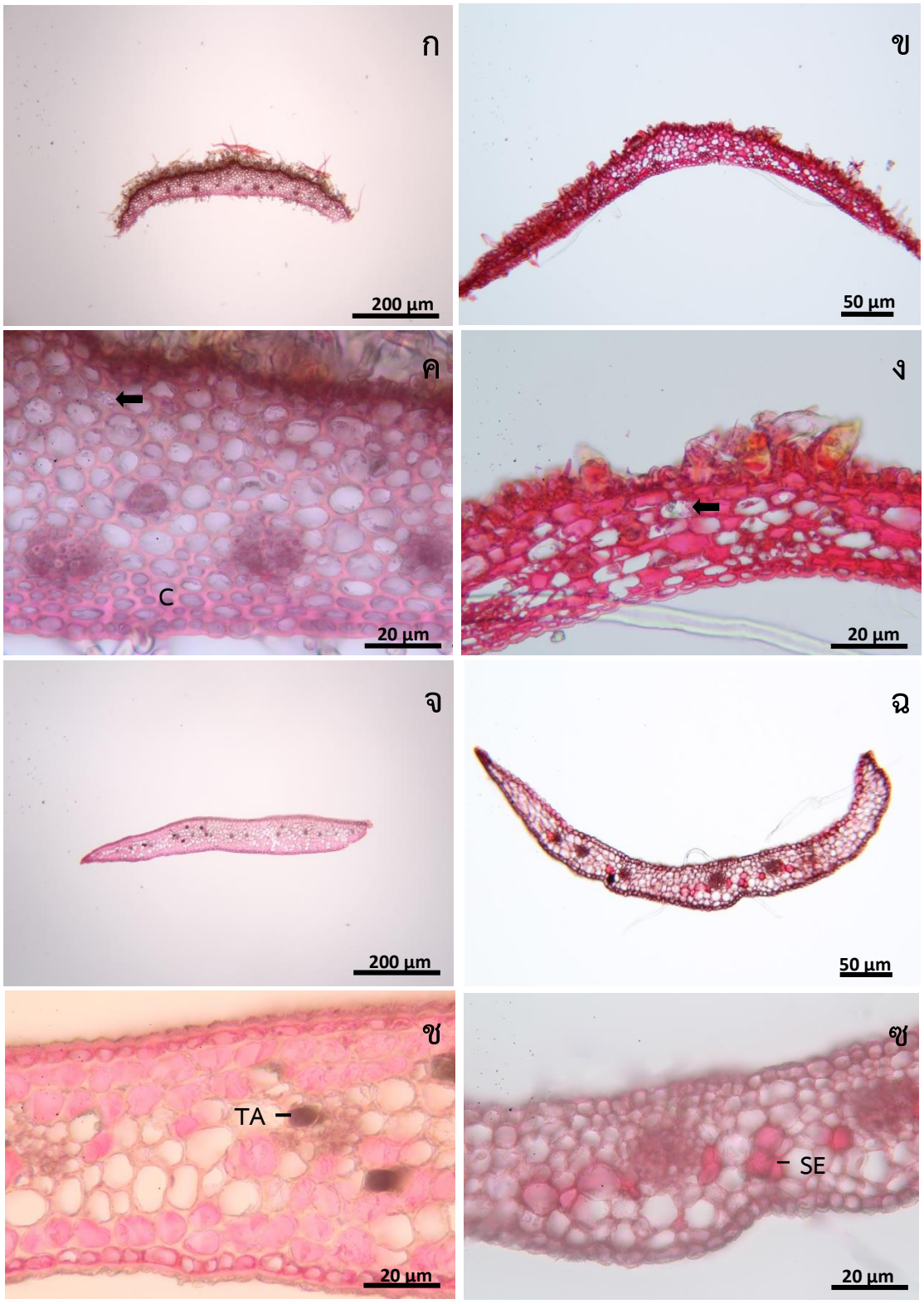
เกสรเพศเมีย ก้านชูเกสรเพศเมีย รูปร่างกลม *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีผิวเคลือบคิวทินไม่ชัดเจน เนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปร่างค่อนข้างกลม *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์คอลเลงคิมาและพาเรงคิมารูปร่างค่อนข้างกลม มีเซลล์หลั่ง สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้งและแทนนิน *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงเป็น 1 วง และพบเซลล์เส้นใยแทรกอยู่ในมัดท่อลำเลียง (ภาพที่ 4ข)

รังไข่ พลาเซนตาแบบรอบแกนร่วม และคาร์เพลมี 7 ช่อง *ระบบเนื้อเยื่อผิว*มีเนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบไทรโคมแบบขนต่อมเซลล์เดียว (ภาพที่ 4ง) *ระบบเนื้อเยื่อพื้น*ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมารูปร่างค่อนข้างกลม สารเออร์แกสติกมีเม็ดแป้ง แทนนิน และผลึกรูปปริซึม *ระบบเนื้อเยื่อลำเลียง* มัดท่อลำเลียงเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ เรียงเป็น 1 วง (ภาพที่ 4ฉ)

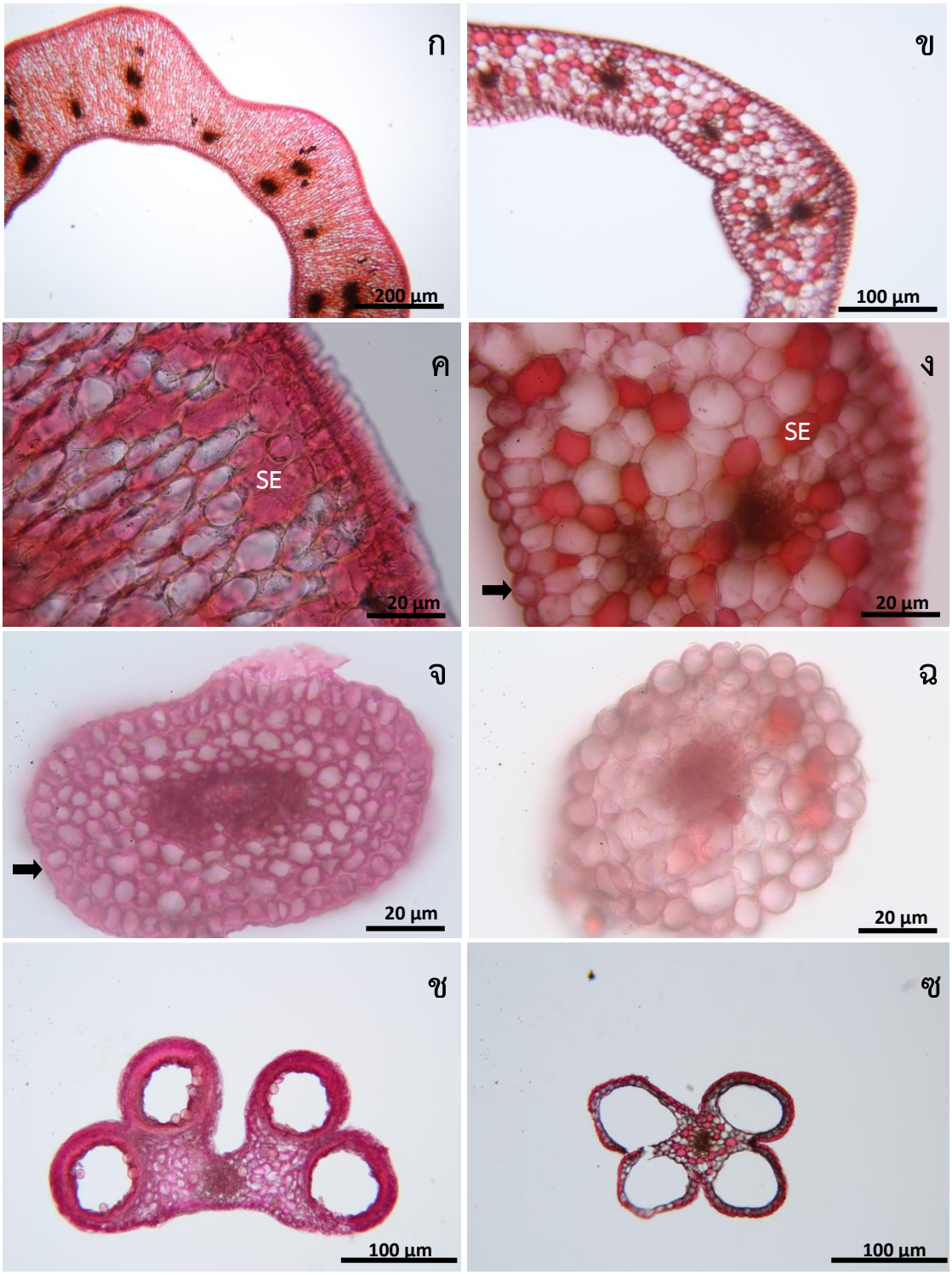


ภาพที่ 1 ภาพตัดตามขวางเปลือกไม้ (ก–ข) และเนื้อไม้ (ค–ง) : ก และ ค *Mi. elengi*; ข และ ง *Ma. thorelii* (LA = เซลล์น้ำยาง, SC = เซลล์สโตน, TA = แทนนิน, V = เวสเซส, ลูกศร = ผลึกรูปปริซึม)

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University



ภาพที่ 2 ภาพตัดตามขวางกลีบเลี้ยง (ก–ง) และแฉกกลีบดอก (จ–ซ) : ก, ค, จ และ ช *Mi. elengi*; ข, ง, ฉ และ ซ *Ma. thorelii* (C = เซลล์คอลเลงคิมา, SE = เซลล์หลั่ง, TA = แทนนิน, ลูกศร = เม็ดแป้ง)



ภาพที่ 3 ภาพตัดตามขวางโคนกลีบดอก (ก–ง) ก้านชูเกสรเพศผู้ (จ–ฉ) และอับเรณู (ช–ซ) : ก, ค, จ และ ช *Mi. elengi*; ข, ง, ฉ และ ซ *Ma. thorelii* (SE = เซลล์หลั่ง, ลูกศร = ผิวเคลือบคิวทิน)

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University



ภาพที่ 4 ภาพตัดตามขวางก้านชูเกสรเพศเมีย (ก–ข) และรังไข่ (ค–ฉ) : ก, ค และ จ *Mi. elengi*; ข, ง และ ฉ *Ma. thorelii*

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ลักษณะทางจุลภาคทั่วไปจากเปลือกไม้และเนื้อไม้ของพิกุลและเดือยไก่ ได้แก่ เซลล์คอร์กในชั้นเพริเดิร์มมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีเซลล์น้ำยาง สารเออร์แกสติกที่สะสมในเปลือกไม้มีผลึกรูปปริซึม แทนนิน และเม็ดแป้ง การกระจายตัวของเวสเซลในเนื้อไม้เป็นแบบกระจาย เวสเซลเป็นแบบเดี่ยว แบบแฝด และแบบกลุ่ม และเนื้อเยื่อแนวรัศมีของไซเล็มมี 1 แถว ซึ่งสนับสนุนการรายงานของ Metcalfe and Chalk (1979) และ Kukachka (1981) โดยข้อมูลที่พบเพิ่มเติม คือ เปลือกไม้พิกุลมีเซลล์หลั่งในเฟลโลเดิร์มและมีเซลล์สโตน สอดคล้องกับการพบเซลล์สโตนในผงยาและเปลือกไม้ตามงานวิจัยของ Kadam et al. (2012) ในขณะที่เดือยไก่ไม่พบเซลล์หลั่งและไม่มีเซลล์สโตน

จากลักษณะทางจุลภาคของส่วนประกอบดอก ได้แก่ กลีบเลี้ยง กลีบดอก เกสรเพศผู้ และเกสรเพศเมีย พบว่าพืชทั้งสองชนิดมีลักษณะสำคัญร่วมกัน คือ กลีบเลี้ยงเป็นรูปเสี้ยวพระจันทร์ ด้านปลายทั้งสองด้านโค้งงอเข้าด้านในและมีไทรโคม ส่วนของกลีบเลี้ยง แฉกกลีบดอก และโคนกลีบดอกทั้งด้านนอกและด้านในมีเนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัวด้านละ 1 ชั้น ก้านชูเกสรเพศผู้มีเนื้อเยื่อชั้นผิวเรียงตัว 1 ชั้น และมีมัดท่อลำเลียง 1 มัด อยู่บริเวณกึ่งกลางของก้านชูแกเสรเพศผู้ อับเรณูมี 4 พู และเรณูเป็นแบบรูซ้อนทับร่อง มี 3–4 ช่องเปิด โดยผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Harley (1991), Kadam et al. (2012), Khare, Kishore and Sharma (2018) และ Moteriya et al. (2018) หากพิจารณากรณีของดอกพิกุลแห้งที่มีการนำมาใช้ในตำรายากันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยกับข้อมูลงานวิจัยทางเภสัชวินิจฉัยของ Shailajan and Gurjar (2015) และ Department of Medical Sciences (2018) รายงานพบน้ำมันหอมระเหย (volatile oil) สารกลุ่มฟีนอลิก (phenolics) และสารกลุ่มเทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ที่ประกอบด้วยสาร β-sitosterol และ lupeol ในดอกแห้ง พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ คือ เนื้อเยื่อพื้นบริเวณโคนกลีบดอกและแฉกกลีบดอกที่ประกอบด้วยเซลล์พาเรงคิมานั้น บางเซลล์เป็นเซลล์หลั่งและบางเซลล์มีสารเออร์แกสติกกลุ่มลิพิดสะสมอยู่ โดยยืนยันได้จากการทดสอบด้วยสีซูดานแบล็คที่ให้ผลเป็นบวก นอกจากนี้ในภาคตัดขวางของรังไข่ยังพบว่าคาร์เพลมี 8 ช่อง และไทรโคมเป็นแบบขนต่อมเซลล์เดียวเช่นเดียวกับการศึกษาทางสัณฐานวิทยาของ Chantaranothai (2014) ที่รายงานว่ารังไข่ของพืชทั้งสองชนิดมีขนแบบหยาบแข็ง (hirsute) เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของพิกุลกับการรายงานของ Department of Medical Sciences (2018) ดังตารางที่ 2 พบว่า ภาคตัดขวางของกลีบเลี้ยงและกลีบดอก ส่วนใหญ่มีลักษณะทางจุลภาคเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ กลีบเลี้ยงมีเนื้อเยื่อผิวจำนวน 1 ชั้น และมีไทรโคมชนิดเซลล์เดียวทั้งแบบมีต่อมและไม่มีต่อมซึ่งกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ระบุว่าไทรโคมของพิกุลมีการสารโอลิโอเรซินภายในเซลล์ และการพบขนรูปโล่ในการศึกษานี้ยังเป็นข้อมูลเพิ่มเติมของชนิดไทรโคมที่เพิ่มขึ้นมา หากพิจารณาลักษณะบางประการที่มีความแตกต่างกับการรายงานของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์เล็กน้อย เช่น กลีบเลี้ยงมีขนหลายเซลล์รูปโล่ กลีบดอกไม่พบปุ่มเล็ก (papillae) ที่เนื้อเยื่อชั้นผิวและชนิดเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อพื้นมีทั้งเซลล์พาเรงคิมาและคอลเลงคิมา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงอายุพืชและตำแหน่งการตัดชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน หรืออีกสาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะตัวอย่างพืชที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เป็นการนำตัวอย่างสดมารักษาสภาพไว้ด้วยแอลกอฮอล์ 70% เพื่อเก็บรักษาไว้ศึกษาลักษณะทางจุลภาค จึงทำให้พืชชนิดเดียวกันสามารถมีลักษณะบางประการที่แตกต่างกันได้ (Bell, n.d.; Metcalfe and Chalk, 1979) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ข้อมูลใหม่เพิ่มเติมจากการรายงานของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ คือ ลักษณะจุลภาคของการตัดตามขวางของเปลือกไม้ เนื้อไม้ เกสรเพศผู้และเกสรเพศเมีย ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบเป็นข้อมูลสนับสนุนหรือข้อมูลเพิ่มเติมจากงานของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ได้เคยรายงานไว้ให้มีความครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะทางจุลภาคบางประการของพิกุลกับงานวิจัยที่ผ่านมา

โครงสร้างที่ศึกษา	Department of Medical Sciences (2018)	งานวิจัยนี้ (2562)
เปลือกไม้		
การมีเซลล์สโตน	-	มี
สารเออร์แกสติก	-	เม็ดแป้ง แทนนิน ผลึกรูปปริซึม และลิพิด
เนื้อไม้		
การเรียงตัวของเซลล์เวสเซล	-	แบบกระจาย
กลีบเลี้ยง		
ชนิดไทรโคม	ขนเซลล์เดียวรูป T-shaped และ shaggy-shaped	ขนเซลล์เดียวแบบมีต่อมและไม่มีต่อม รูปเส้นด้ายและขนหลายเซลล์รูปโล่
จำนวนชั้นของเนื้อเยื่อผิว	1 ชั้น	1 ชั้น
การมีเนื้อเยื่อชั้นรองจากผิว	-	มี 1–2 ชั้น
สารเออร์แกสติกที่พบในเนื้อเยื่อพื้น	-	เม็ดแป้ง
กลีบดอก		
การมีปุ่มเล็ก	มี	ไม่มี
สารเออร์แกสติก	-	แทนนิน
ชนิดเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อพื้น	เซลล์พาเรงคิมา	เซลล์พาเรงคิมา หรือ เซลล์พาเรงคิมากับเซลล์คอลเลงคิมา (บางเซลล์เป็นเซลล์หลั่ง)
เกสรเพศผู้		
จำนวนพูของอับเรณู	-	4 พู
ชนิดเรณู	แบบรูซ้อนทับร่อง มี 4 ช่องเปิด	แบบรูซ้อนทับร่อง มี 3–4 ช่องเปิด
ชนิดเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อพื้นในก้านชูเกสรเพศผู้	-	เซลล์พาเรงคิมา
เกสรเพศเมีย		
ชนิดไทรโคมที่รังไข่	-	ขนเซลล์เดียวแบบมีต่อม
จำนวนช่องในรังไข่	-	8 ช่อง
สารเออร์แกสติกในก้านชูเกสรเพศเมีย	-	แทนนินและแป้ง
ชนิดเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อพื้นในก้านชูเกสรเพศเมีย	-	เซลล์พาเรงคิมาและเซลล์คอลเลงคิมา

หมายเหตุ: - คือ ไม่ได้รายงานไว้

เอกสารอ้างอิง

Bell, C. R. (n.d.). **Plant Variation and Classification**. Macmillan, London.

Bureau of Drug and Narcotic, Department of Medical Sciences. (2017). **Handbook of Data Preparation of Thai Herbs in Thai Herbal Pharmacopoeia** (in Thai). Nonthaburi: 1241 Miraculous.

Chantaranothai, P. (2014). Sapotaceae. In T. Santisuk and H. Balslev (Eds.), **Flora of Thailand**, Vol. 11(4), pp. 610–655. Bangkok: Prachachon Co. Ltd.

Chuakul, W., Prathanturarug, S. and Jenjittikul, T. (2000). **Encyclopedia of Thai Herbs, no. 4, Isan medicinal plants** (in Thai). Bangkok: Amarin Printing and Publishing.

Department of Medical Sciences. (2018). **Thai Herbal Pharmacopoeia 2018**. Bangkok: Keawjawjom & Suan Sunandha Rajabhat University.

Forest and Plant Conservation Research Office Director. (2013). Pikun, Mimusops elengi Linn (in Thai). In M. Ruadrew and N. Cheerawatnapan (Eds.), **Medicinal Plants in Botanical Gardens and Arboretums**. Bangkok: SP Plate.

Forest and Plant Conservation Research Office Director. (2015). **Medicinal Plants in Botanical Gardens and Arboretums**, No. 2 (in Thai). Bangkok: SP Plate.

Gami, B. Pathak, S. and Parabia, M. (2012). Ethnobotanical, phytochemical and pharmacological review of *Mimusops elengi* Linn. **The Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, 2(9), 743–748.

Harley, M. M. (1991). The pollen morphology of the Sapotaceae. **Kew Bulletin**, 46(3), 379–491.

Kadam, P. V., Deoda, R. S., Shivatare, R. S., Yadav, K. N. and Patil, M. J. (2012). Pharmacognostic, phytochemical and physiochemical studies of *Mimusops elengi* Linn. stem bark (Sapotaceae). **Der Pharmacia Lettre**, 4(2), 607–613.

Kadam, P. V., Yadav, K. N., Deoda, R. S., Shivatare, R. S. and Patil, M. J. (2012). *Mimusops elengi*: A review on ethnobotany, phytochemical and pharmacological profile. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, 1(3), 64–74.

Kaspo, P. (2014). **Study on linear equation for Non-destructive leaf area estimation of 10 fragrant plants**. Departmant of Horticulture, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom.

Khare, P., Kishore, K. and Sharma, D. K. (2018). Medicinal uses, phytochemistry and pharmacological profile of Madhuca longifolia. Asian Journal of Pharmacy and Pharmacology, 4(5), 448–459.

Kukachka, B. F. (1981). Wood anatomy of the neotropical Sapotaceae: XX *Minilkara*. **Research Paper FPL**, 371, 1–14.

Metcalfe, C. R. and Chalk, L. (1979). **Anatomy of the Dicotyledons vol. 1**, 2nd ed. London: Oxford at the Carendon Press.

Moteriya, P., Padalia, H., Rathod, T., Desai, D. and Chanda, S. (2018). Phamarcognostic standardization of *Madhuca indica* leaf and stem, an important medicinal plant. **International Journal of Phamaceutical Sciences and Research**, 6(2), 705–711.

National Drug System Development Committee. (2012). **National List of Essential Medicines** (in Thai). Royal Thai Government Gazette, 23 January 2013.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Office of the Permanent Secretary for Ministry of Natural Resources and Environment. (2007). **Encyclopedia of Bioresources in Chik Du, Hua Taphan District, Amnat Charoen** (in Thai). Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment.

Shailajan, S. and Gurjar, D. (2015). Evaluation of *Mimusops elengi* L. flowers using pharmacognostic approach. **Pharmacognosy Communications**, 5(1), 83–92.

Zollner, T. and Schwarz, M. (2013). Herbal reference standards: applications definitions and regulatory requirements. **Revista Brasileira de Farmacognosia Brazilian Journal of Pharmacognosy**, 23(1), 1–21.

บทความวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียม ไทเทเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า

อ้อฤทัย ใจบุญ[1,*] วุฒิชัย พรมวงศ์[2] วิภาดา สุวรรณไตรย์[3] และวรางคณา วังคะฮาด[4]

[1]ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[2]แผนกวิชาสามัญสัมพันธ์ วิทยาลัยเทคนิคเดชอุดม

[3]หมวดวิทยาศาสตร์ โรงเรียนมารีวิทย์ สัตหีบ

[4]หมวดวิทยาศาสตร์ โรงเรียนอัญสัมชัญอุบลราชธานี

**Email: oruethai.j@ubu.ac.th*

รับบทความ: 9 ธันวาคม 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 29 ธันวาคม 2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันแมกนีเซียมอัลลอย ไทเทเนียมอัลลอย และเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ลดปัญหามลพิษจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ แต่ยังสามารถรักษาความปลอดภัยของผู้โดยสารได้ แต่ปัญหาที่สำคัญในการใช้งานวัสดุประเภทโลหะคือการกัดกร่อน ในงานวิจัยนี้จึงศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า 2 วิธี ได้แก่ การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาการกัดกร่อนในน้ำปราศจากไอออน และในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ผลการทดลองจากทั้ง 2 วิธีให้ผลไปในทางเดียวกันว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมการกัดกร่อนที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ โดยแมกนีเซียมจะพบการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ และการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอนี้จะรุนแรงขึ้นเมื่อในสารละลายมีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ สำหรับไทเทเนียมพบว่าในน้ำปราศจากไอออนมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยเพื่อป้องกันผิวจากการกัดกร่อน และในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่พบการกัดกร่อนแบบ metastable pitting ที่ไม่รุนแรง ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมพบการกัดกร่อนแบบ metastable pitting อย่างรุนแรงเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ นอกจากนี้เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมการกัดกร่อนสามารถพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion ได้ ซึ่งเทคนิคไฟฟ้าเคมีทั้ง 2 วิธีให้ผลไปในทางเดียวกัน แต่การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลาเป็นเทคนิคที่ไม่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกเพื่อรบกวนระบบ เทคนิคนี้จึงจัดเป็นการทดสอบโดยไม่ทำลายที่น่าจะสามารถพัฒนาไปใช้ในการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันทีได้ โดยเฉพาะกับโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

คำสำคัญ: โลหะ วัสดุน้ำหนักเบา การกัดกร่อน โพลาไรเซชัน ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

อ้างอิงบทความนี้

อ้อฤทัย ใจบุญ วุฒิชัย พรมวงศ์ วิภาดา สุวรรณไตรย์ และวรางคณา วังคะฮาด. (2562). การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียม ไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 2(2), 116-126.

Research Article

Study of corrosion behavior of magnesium, titanium and stainless steel by electrochemical techniques

Oruethai Jaiboon[1,*], Wuttichai Promwong[2], Warangkana Wangkahad[3] and Wipada Suwannatrai[4]

[1]Physics Department, Faculty of Science, Ubonratchathani University

[2]General Subject Department, Det-udom Technical College

[3]Science Department, Maryvit Sattahip School

[4]Science Department, Assumption College Ubonratchathani

**Email: oruethai.j@ubu.ac.th*

Received <9 December 2019>; Accepted <29 December 2019>

Abstract

Nowadays, magnesium alloys, titanium alloys and stainless steel are extensively used in automotive and aerospace industries because they are light in weight and exhibit high strength-to-weight ratio. Due to their excellent properties, fuel consumption and exhaust emission of vehicle can be reduced while its safety capability can be conserved. However, a major problem in the use of metals in many industries is corrosion. Therefore, this research is aimed at investigating corrosion behavior of pure magnesium, pure titanium and stainless steel AISI 304 in deionized water and solution containing aggressive Cl^- ions by using 2 electrochemical techniques: measurement of open circuit potential with time and polarization measurement. It was found that both techniques provided the same results that all 3 materials exhibit different corrosion behavior. Magnesium underwent uniform corrosion in deionized water and this uniform corrosion was escalated into more serious in solution containing chloride ions. For titanium, passive oxide film was formed on its surface when immersion in deionized water but in solution contain chloride ions, its passive surface was attacked by few metastable pitting corrosions. For Stainless steel AISI 304, serious metastable pitting corrosion was observed when it was immersed in solution containing chloride ions and the stable pitting corrosion of stainless steel as well can be easily activated by applying low voltage. Both electrochemical techniques lead to the same results, but measurement of open circuit potential with time requires no external perturbation so it is considered as a nondestructive technique and can be applied to a real time corrosion monitoring system, especially for pitting corrosion.

Keywords: Metal, lightweight material, Corrosion, Polarization curve, Open circuit potential

Cite this article:

Jaiboon, O., Promwong, W., Wangkahad, W. and Suwannatrai W. (2019). Study of corrosion behavior of magnesium, titanium and stainless steel by electrochemical techniques (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 2(2), 116-126.

บทนำ

ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน วัสดุที่จะนำมาใช้ควรมีน้ำหนักเบา เพื่อลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน และยังช่วยลดการปล่อยควันเสียจากเครื่องยนต์อีกด้วย นอกจากต้องมีน้ำหนักเบาแล้ววัสดุเหล่านี้จะต้องมีความแข็งแรงสูงด้วย เพื่อช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้ผู้โดยสาร ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยานจะต้องมีค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) สูงนั้นเอง ตัวอย่างวัสดุที่นำมาใช้งานในอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้แก่ ไทเทเนียมอัลลอย แมกนีเซียมอัลลอย เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น (Mallick, 2010) แต่ปัญหาสำคัญและสูญเสียค่าใช้จ่ายในการนำชิ้นส่วนที่ทำจากโลหะหรือโลหะผสมไปใช้งานจริงคือ การกัดกร่อน (corrosion) เพื่อลดการเสียหายของการกัดกร่อนจึงจำเป็นต้องศึกษาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะต่าง ๆ และนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาวิธีการตรวจสอบการกัดกร่อนที่เกิดจากชิ้นงานที่ทำจากวัสดุนั้น ๆ ต่อไป การตรวจสอบการกัดกร่อนสามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การวัดน้ำหนักที่หายไป (weight loss measurement) การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลา (measurement of open circuit potential with time) และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (polarization measurement) การศึกษาพฤติกรรมความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะโดยการให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับแก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical impedance) และ การวัดสัญญาณรบกวนทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical noise measurement) เป็นต้น (Vargel, 2004) ซึ่งวิธีแต่ละวิธีนอกจากจะมีกระบวนการวัดที่แตกต่างกันแล้ว ชนิดข้อมูลที่ได้ยังแตกต่างกันอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา ข้อมูลที่ได้จากวิธีการนี้จะบอกถึงชนิดของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะในธรรมชาติโดยไม่ต้องป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าไปรบกวนระบบ ส่วนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ กับโลหะที่ศึกษาแล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนเส้นโค้งโพลาไรเซชัน เส้นโค้งนี้นอกจากสามารถบอกชนิดการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นกับโลหะได้แล้วยังสามารถบอกค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) อีกด้วย (Bard, Stratmann and Frankel, 2003)

งานวิจัยนี้จึงเริ่มจากการศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ และโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้กับการศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของแมกนีเซียมอัลลอยด์ และไทเทเนียมอัลลอยด์อื่น ๆ ต่อไป และเหล็กกล้าไร้สนิมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาการกัดกร่อนในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ เนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นไอออนรุนแรงที่กระตุ้นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) ที่เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized corrosion) แบบหนึ่ง การกัดกร่อนแบบนี้เป็นการสร้างรูเข็มเล็ก ๆ ลึกลงไปในเนื้อของโลหะ จึงตรวจสอบได้ยาก และกว่าจะตรวจพบก็ส่งผลเสียหายอย่างรุนแรงแก่ชิ้นงาน ต่างจากการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) ซึ่งเป็นการสูญเสียพื้นผิวของโลหะไปเรื่อย ๆ เป็นบริเวณกว้างหรือทั่วผิวหน้า ทำให้โลหะบางลงเรื่อย ๆ ซึ่งการกัดกร่อนแบบนี้ไม่ค่อยก่อปัญหามากนัก เนื่องจากตรวจสอบง่ายโดยวิธีการหาน้ำหนักที่หายไป เป็นต้น (Vargel, 2004) นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบที่มีการกัดกร่อน (corroding system) โดยไม่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกกับโลหะที่สนใจ สามารถระบุการกัดกร่อนในธรรมชาติของโลหะนั้น ๆ ได้ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการกัดกร่อนทั่วทั้งผิวหน้า และการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีลักษณะแตกต่างกัน ทำให้เทคนิคนี้สามารถระบุชนิดของการกัดกร่อน และ อัตราการกัดกร่อนชั่วขณะ (instant corrosion rate) ได้ (Caines et al., 2017 ;Xia et al., 2017) ทำให้วิธีการนี้มีศักยภาพที่จะพัฒนาไปเป็นเทคนิคในการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันทีได้ โดยเฉพาะกับโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ยากต่อการตรวจสอบ เช่น การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การกัดกร่อนภายใต้ฉนวนของท่อขนส่งน้ำมันดิบ (Caines et al., 2017) และการกัดกร่อนแบบกัลวานิกของอะลูมิเนียมอัลลอยที่สัมผัสกับคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยคาร์บอน

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

(Wang and Li , 2018) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังต้องได้รับการพัฒนาเพื่อให้ง่ายต่อการตรวจสอบการกัดกร่อนของโลหะเหล่านี้ในการใช้งานจริงที่แตกต่างกันในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า 2 วิธี คือ การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า เพื่อหารูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่เปรียบเทียบกับการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในน้ำปราศจากไอออน และเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากวิธีทางเคมีไฟฟ้า 2 วิธี เพื่อศึกษาว่าวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาสามารถระบุรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะที่ศึกษาได้เช่นเดียวกับวิธีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าหรือไม่

วิธีดำเนินการวิจัย

(1) การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา

การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่สนใจเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง โดยไม่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกให้แก่โลหะ ซึ่งโลหะที่สนใจได้แก่ โลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ 99.95% โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ 99.99% และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยวิธีการทดลองเริ่มจากทำความสะอาดโลหะที่ต้องการวัดด้วยอะซิโตน (acetone) หลังจากนั้นนำโลหะที่ต้องการจะศึกษามาต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) รุ่น PGSTAT302N ของบริษัท Metrohm โดยโลหะที่ต้องการวัดจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) ส่วนอิเล็กโทรด Ag/AgCl จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดทั้งสองในน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เครื่องโพเทนชิโอสแตทจะทำการวัดศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะในสารละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าที่วัดได้จะนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา จากกราฟสามารถแปลงผลมาเป็นข้อมูลเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะเมื่ออยู่ในสารละลาย ซึ่งจะทำให้ทราบรูปแบบการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นจริงกับโลหะในธรรมชาตินั้น ๆ ได้

(2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

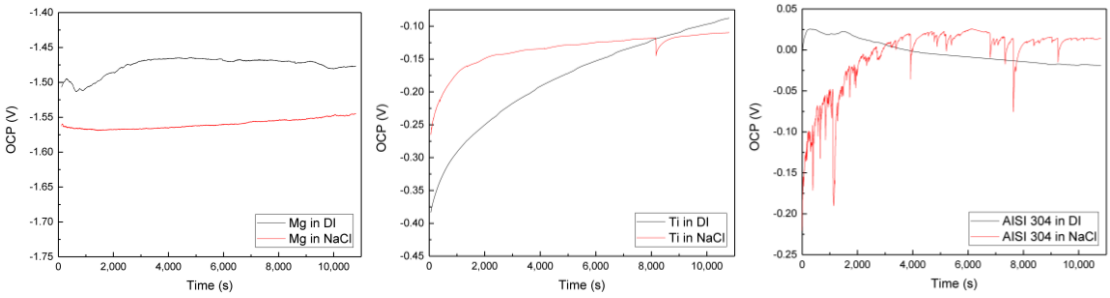
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าขณะกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าบวกให้กับโลหะที่สนใจ โดยวิธีการทดลองเริ่มจากทำความสะอาดโลหะที่ต้องการวัดด้วยอะซิโตน (acetone) หลังจากนั้นนำโลหะที่ต้องการจะศึกษามาต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท โดยโลหะที่ต้องการวัดจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) ส่วนอิเล็กโทรด Ag/AgCl จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) และแท่งแพลทินัม (Platinum) จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดทั้งสามในน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งเครื่องโพเทนชิโอสแตทจะเริ่มต้นด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (OCP) ของโลหะที่สนใจเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิงเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเครื่องโพเทนชิโอสแตทจะป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ให้กับอิเล็กโทรดตัวอย่าง โดยเริ่มจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่า OCP ประมาณ 0.2 V และเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ ทีละ 0.001 V/s จนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า OCP ประมาณ 1.0 V หรือ 2.0 V แล้วทำการวัดกระแสกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างอิเล็กโทรดตัวอย่างกับอิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) สำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดตัวอย่าง เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะได้กราฟที่เรียกว่า “เส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve)” จากกราฟเส้นโค้งโพลาไรเซชันนี้จะได้ค่าสำคัญต่าง ๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential: E_{corr}) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion potential) นอกจากค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ลักษณะของเส้นโค้งโพลาไรเซชันยังบอกถึง

ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะในสารละลายนั้น ๆ ได้อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาลักษณะของเส้นโค้งโพลาไรเซชันเพื่อบอกถึงรูปแบบการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นได้กับโลหะเท่านั้น

ผลการวิจัย

(1) การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา

การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของโลหะต่าง ๆ กระทำทั้งในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อเปรียบเทียบว่าเมื่อโลหะนั้น ๆ เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ไอออนรุนแรงนี้จะกระตุ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการกัดกร่อนของโลหะได้หรือไม่ ดังที่แสดงในภาพที่ 1 จะเห็นว่า โลหะแต่ละชนิดเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ กราฟการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลาจะแตกต่างจากในน้ำปราศจากไอออน



(ก) โลหะแมกนีเซียม (ข) โลหะไทเทเนียม (ค) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (OCP) เทียบกับเวลาของโลหะต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน (DI) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ภาพที่ 1ก แสดงการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของโลหะแมกนีเซียมในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะแมกนีเซียมในน้ำปราศจากไอออนมีค่าต่ำมากอยู่ที่ประมาณ -1.50 V แสดงว่าผิวของโลหะแมกนีเซียมไวต่อปฏิกิริยา (active surface) และค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดนี้ค่อนข้างคงที่ตลอด 3 ชั่วโมง แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นบนผิวของโลหะแมกนีเซียมนี้ หมายความว่าผิวโลหะสัมผัสกับน้ำปราศจากไอออนตลอดการทดลอง หรือกล่าวได้ว่ามีการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion) เกิดขึ้นบนผิวของโลหะแมกนีเซียมแม้อยู่ในน้ำปราศจากไอออน และเมื่อโลหะแมกนีเซียมนี้อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าน้อยลงอยู่ที่ประมาณ -1.55 V และเกือบคงที่ตลอด 3 ชั่วโมง แสดงว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ผิวของโลหะแมกนีเซียมเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ โดยไม่มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยมาปกป้องผิวของโลหะ เช่นเดียวกับในน้ำปราศจากไอออน ซึ่งได้มีงานวิจัยกล่าวว่า ในโลหะสำหรับงานโครงสร้างทั้งหมด แมกนีเซียมจัดเป็นโลหะที่ไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่สุด เนื่องจากเมื่อโลหะแมกนีเซียมอยู่ในสารละลาย จะมีการสร้างฟิล์มบางของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide, $Mg(OH)_2$) บนผิวของโลหะ ซึ่งฟิล์มแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นี้จะเสถียรในสารละลายที่มี pH 11 ดังนั้นเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกลาง ฟิล์มบางนี้จะถูกทำลาย ทำให้ผิวของโลหะสัมผัสกับสารละลายเรื่อย ๆ กลายเป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง (Inoue et al., 2001)

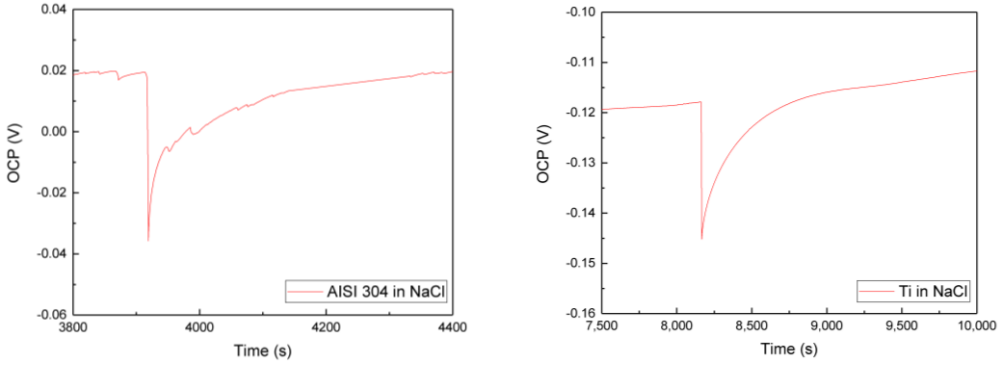
ภาพที่ 1ข แสดงการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของโลหะไทเทเนียมในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 M พบว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะไทเทเนียมในน้ำปราศจากไอออนเริ่มต้นที่ -0.43 V ซึ่งค่อนข้างสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1,000 s แรก หลังจากนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ายังคงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลงจนสิ้นสุดการทดลอง 3 h ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดอยู่ที่ -0.09 V จากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าในน้ำปราศจากไอออน ไทเทเนียมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อย (passive film) ขึ้นมา

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

ปกป้องผิวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และเมื่อโลหะไทเทเนียมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเริ่มต้นที่ -0.27 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้น หลังจากผ่านไปประมาณ 2,000 s อัตราการเพิ่มขึ้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนไปสิ้นสุดที่ค่า -0.11 V ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตลอด 3 h แสดงให้เห็นว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นบนผิวของโลหะไทเทเนียมถึงแม้ว่าจะอยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของไทเทเนียมระหว่างในน้ำปราศจากไอออนและในสารละลายโซเดียมคลอไรด์พบว่า ในน้ำปราศจากไอออนไทเทเนียมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นอย่างรวดเร็วแค่ในช่วงแรกๆเท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตลอด 3 h พบว่าในน้ำปราศจากไอออนค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.34 V แต่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพียง 0.16 V แสดงว่าฟิล์มเฉื่อยที่สร้างขึ้นในน้ำปราศจากไอออนเสถียรกว่าหรือเฉื่อยกว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากคลอไรด์ไอออนในสารละลายเข้าไปรวมตัวในฟิล์มเฉื่อยทำให้ฟิล์มเฉื่อยเสถียรน้อยลง และอาจทำให้เกิดการแตกของฟิล์มเฉื่อย (breakdown of passive film) ได้ง่าย ซึ่งเห็นได้จากศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของไทเทเนียมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 8,000 ถึง 9,000 s พบการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นในช่วงสั้น ๆ เรียกว่า “สัญญาณชั่วขณะ (short transient)” ซึ่งเมื่อขยายลักษณะสัญญาณชั่วขณะดังภาพที่ 2 (ก) จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก -0.118 V ไปเป็น -0.145V และไม่กี่วินาทีหลังจากนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกลับเข้าสู่ศักย์ไฟฟ้าเดิมหลังจากผ่านไป 834 วินาที ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของสัญญาณชั่วขณะนี้แสดงว่ามีการแตกของฟิล์มเฉื่อยที่ปกป้องผิวของโลหะไทเทเนียม ทำให้โลหะไทเทเนียมสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์โดยตรง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะหรือทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุด (localized corrosion) เจาะเป็นรูเข็มลึกลงไปในผิวของโลหะ เพียงชั่วขณะหลังจากนั้นศักย์ไฟฟ้าค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แสดงว่าผลิตภัณฑ์ (by product) จากการกัดกร่อนค่อย ๆ ปกคลุมปากของรอยแตกนั้น จนปากของรอยแตกปิดสนิทเกิดเป็นฟิล์มเฉื่อยปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อนอีกครั้ง (Sasaki and Isaacs, 2004) การเปลี่ยนแปลงชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้จึงเรียกว่า “metastable pitting corrosion” เพราะเกิดรูเข็มขนาดเล็กบนผิวของโลหะจากการกัดกร่อนในระยะสั้น ๆ (Cottis, 2006) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะไทเทเนียมมีความเสถียรมากเมื่ออยู่ในน้ำปราศจากไอออน และถึงแม้จะอยู่ในสารละลายที่มีไอออนที่สามารถกระตุ้นการกัดกร่อนอย่างคลอไรด์ไอออน โลหะไทเทเทียมยังมีความเสถียรอยู่มาก แต่อาจเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้บ้างแต่เกิดขึ้นไม่บ่อยนัก โดยมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมจัดเป็นโลหะเฉื่อย (passive metal) ที่เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีออกซิเจนผสมอยู่ จะมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยที่เสถียร (stable passive film) ของออกไซด์ (TIO_2) บนผิวของโลหะไทเทเนียม ซึ่งฟิล์มเฉื่อยนี้จะช่วยป้องกันผิวของไทเทเนียมจากการกัดกร่อน และถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออนผสมด้วย คลอไรด์ไอออนจะไปรวมอยู่ในฟิล์มกลายเป็นฟิล์มของ oxochorocomplex ซึ่งไม่เสถียรเท่าฟิล์มของออกไซด์ ทำให้ฟิล์มแตกเฉพาะที่ และสามารถพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่อไปได้ (Palit and Elayaperumal, 1978; Fekry, 2009)

ภาพที่ 1ค แสดงการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเริ่มต้นของเหล็กกล้าไร้สนิมในน้ำปราศจากไอออนอยู่ที่ 0.025 V และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 3 h ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเพียงเล็กน้อยไปอยู่ที่ -0.018 V แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมในน้ำปราศจากไอออน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเส้นฐานหรือเส้นโค้งหลักเมื่อไม่พิจารณาสัญญาณชั่วขณะ (baseline) ของศักย์ไฟฟ้าสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนและไม่พบสัญญาณชั่วขณะใด ๆ เกิดขึ้น แต่เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เส้นฐานของศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 4,000 s แรก แล้วหลังจากนั้นเส้นฐานค่อนข้างคงที่ แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นบนผิวจนได้ความหนาหรือความเฉื่อยระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามมีสัญญาณชั่วขณะเกิดขึ้นจำนวนมากตลอดเวลา 3 h ทำให้เห็นเส้นฐานไม่ชัดเจนอย่างในน้ำปราศจากไอออน ซึ่งเมื่อขยายสัญญาณชั่วขณะจะมีลักษณะดังภาพที่ 2ข ซึ่งมีการลดลงของศักย์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นศักย์ไฟฟ้าค่อยๆกลับคืนสู่เส้นฐานเดิมหลังจากผ่านไป 411 s สัญญาณที่ตรวจพบนี้เกิดจากการแตกของฟิล์มเฉื่อย และเกิดเป็น metastable pitting corrosion การแตกของฟิล์มเฉื่อยนี้อาจเกิดขึ้นหลายครั้ง ทำให้เกิดรูเข็มขนาดเล็กหลายรู หรือเกิดหลาย ๆ รูเข็ม

พร้อม ๆ กันบนผิวของเหล็กกล้าทำให้เป็นรูเข็มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่จะมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยมาปกป้องผิว แต่ฟิล์มเฉื่อยนี้อาจไม่เสถียรทำให้มีการแตกของฟิล์มเฉพาะจุด และเกิดการกร่อนแบบ metastable pitting corrosion จำนวนมากได้ ซึ่งมีงานวิจัยที่ตรวจสอบพบสัญญาณชั่วขณะของกระแสไฟฟ้าที่บ่งบอกว่ามีการเกิด metastable pitting corrosion บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ได้ แม้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Feng et al, 2016)



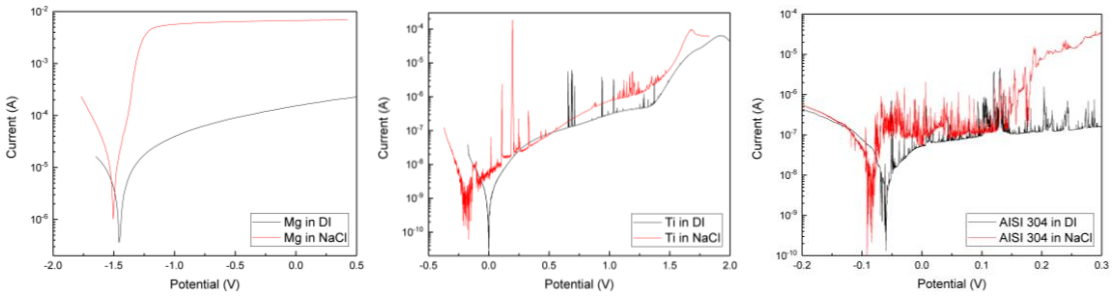
(ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (ข) โลหะไทเทเนียม

ภาพที่ 2 สัญญาณชั่วขณะ “short transient” ของศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะต่างๆ

(2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเป็นศึกษาการกัดกร่อนที่สามารถจะเกิดขึ้นได้กับโลหะนั้น ๆ โดยการวัดกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าค่าบวกให้แก่โลหะที่ต้องการจะศึกษา เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) บนผิวของโลหะ รูปที่ 3ก คือเส้นโค้งโพลาไรเซชันของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ในน้ำปราศจากไอออนและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าในน้ำปราศจากไอออน เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะแมกนีเซียมใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}≈ -1.5 V) กระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นบวกและมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ที่ประมาณ 10^{-4} A และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงว่าเมื่ออยู่ในน้ำปราศจากไอออน มีการกัดกร่อนที่ค่อนข้างรุนแรงเกิดขึ้นบนผิวของโลหะแมกนีเซียม และอัตราการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าด้วย ซึ่งการกัดกร่อนที่ว่าเป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอและไม่มีการสร้างฟิล์มบางขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อน และเมื่ออยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงมากอยู่ที่ประมาณ 10^{-2} A ซึ่งสูงกว่าในน้ำปราศจากไอออนประมาณ 100 เท่า และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะแมกนีเซียมมากขึ้นกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่แสดงว่ามีการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอที่รุนแรงมากทั่วทั้งผิวหน้าของโลหะที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ทำให้เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการกัดกร่อนไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะแมกนีเซียมมีผิวที่ไวต่อปฏิกิริยาอย่างมาก (active surface) ทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอที่ค่อนข้างรุนแรงแม้ในน้ำปราศจากไอออน โดยไม่มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยมาปกป้องผิวของโลหะ และเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีไอออนรุนแรงอย่างคลอไรด์ไอออน การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอถูกกระตุ้นให้รุนแรงยิ่งขึ้น

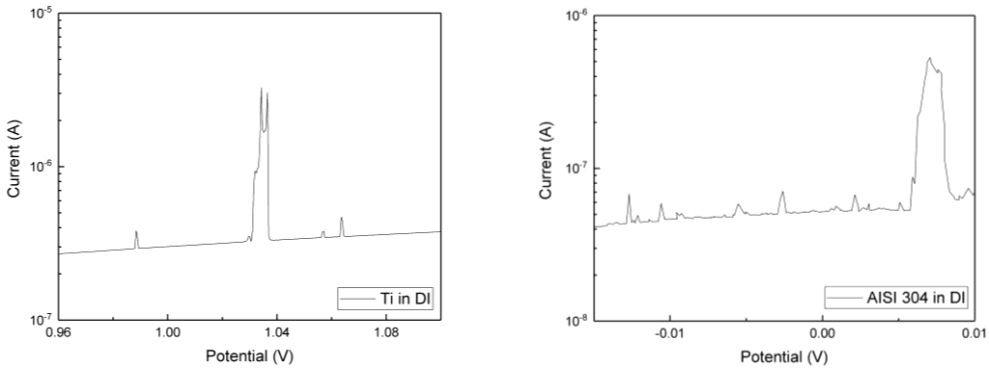
Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University



(ก) โลหะแมกนีเซียม (ข) โลหะไทเทเนียม (ค) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ภาพที่ 3 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของโลหะต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน (DI) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

เส้นโค้งโพลาไรเซชันของโลหะไทเทเนียมแสดงในรูปที่ 3 (ข) พบว่าในน้ำปราศจากไอออน เส้นฐานของเส้นโค้งโพลาไรเซชันสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะไทเทเนียมสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}≈ -2.3 V) เล็กน้อย ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ค่อนข้างต่ำมากในระดับ 10^{-7} A และเมื่อค่อย ๆ เพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโลหะไทเทเนียม กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะไทเทเนียมจากการกัดกร่อน และเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ฟิล์มเฉื่อยค่อย ๆ บางลงจนถึงศักย์ไฟฟ้าที่ E=1.332 V เกิดปฏิกิริยาบางอย่างที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอาจเป็น stable pitting corrosion หรือ oxygen evolution ที่เกิดขึ้นกับฟิล์มเฉื่อยของโลหะไทเทเนียมก็ได้ นอกจากนี้ยังพบสัญญาณชั่วขณะหลังจากป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะไทเทเนียมจนมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า E= 0.6 V ซึ่งสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4(ก) จะเห็นได้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้านี้แสดงว่ามีการแตกของฟิล์มเฉื่อย ทำให้ผิวของโลหะไทเทเนียมสัมผัสกับน้ำปราศจากไอออนโดยตรง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะชั่วขณะ เจาะเป็นรูเข็มเล็ก ๆ ลึกลงไป ปฏิกิริยาออกซิเดชันสร้างอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากในโลหะ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นชั่วขณะ หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าลดลงสู่เส้นฐานอีกครั้ง แสดงว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันหยุดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนปกปิดปากของรอยแตกกลายเป็นฟิล์มเฉื่อยปกป้องผิวของโลหะ ลักษณะสัญญาณชั่วขณะแบบนี้แสดงว่ามีการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion เกิดขึ้น (Bard, Stratmann and Frankel, 2003) แสดงว่าโลหะไทเทเนียมเมื่ออยู่ในน้ำปราศจากไอออนจะมีการสร้างฟิล์มบางขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อน ซึ่งฟิล์มเฉื่อยนี้อาจมีการแตกเฉพาะจุด ทำให้เกิด metastable pitting corrosion ขึ้นได้แต่เกิดขึ้นน้อยครั้งนัก แต่เมื่อโลหะไทเทเนียมนี้อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เส้นฐานเห็นได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากมีสัญญาณชั่วขณะจำนวนจำนวนหนึ่ง และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ค่อนข้างต่ำมากในระดับ 10^{-7} A แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะไทเทเนียม แต่ฟิล์มเฉื่อยนั้นไม่ค่อยแข็งแรงจึงเกิดการแตกเฉพาะจุด ทำให้ metastable pitting corrosion เกิดขึ้นบนผิวของโลหะไทเทเนียม และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น พบว่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงว่าฟิล์มเฉื่อยบางลงหรือเฉื่อยน้อยลงเรื่อย ๆ เนื่องจากมีคลอไรด์ไอออนเข้าไปแทรกอยู่ในฟิล์มเฉื่อยด้วย นอกจากนี้ยังพบสัญญาณชั่วขณะของ metastable pitting corrosion เกิดขึ้นด้วย และที่ศักย์ไฟฟ้าที่ E=1.332 V กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่ลดลงอีกเลย แต่เนื่องจากมีปรากฏการณ์เช่นเดียวกันนี้เกิดขึ้นในน้ำปราศจากไอออนที่ศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน จึงแสดงว่าไม่ใช่การกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion แต่เป็น oxygen evolution ของฟิล์มเฉื่อย ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะไทเทเนียมมีผิวที่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยา (passive surface) เนื่องจากมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิว แต่เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ฟิล์มเฉื่อยนี้อาจเกิดการแตก ทำให้การกัดกร่อนเฉพาะที่เกิดขึ้นได้ แต่การกัดกร่อนนี้จะเป็นการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion เพราะผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนจะค่อย ๆ ปกคลุมรอยแตกทำให้รอยแตกปิดสนิทกลายเป็นฟิล์มเฉื่อยอีกครั้ง



(ก) โลหะไทเทเนียม (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ภาพที่ 4 สัญญาณ “short transient” ที่เกิดขึ้นบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันของโลหะต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน

เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในน้ำปราศจากไอออน ดังแสดงในภาพที่ 3ค เมื่อพิจารณาเส้นฐานพบว่า ที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}≈ -0.05 V) กระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมากในระดับ 10^{-7} A และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะอย่างรวดเร็ว และฟิล์มนี้ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำปราศจากไอออนทำให้ความหนาของฟิล์มค่อนข้างคงที่แม้ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโลหะเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีสัญญาณชั่วขณะจำนวนมากเกิดขึ้นตลอดเวลา ภาพขยายสัญญาณชั่วขณะนี้แสดงอยู่ในภาพที่ 4ข ซึ่งกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วตกกลับเข้าสู่เส้นฐานเช่นเดียวกับสัญญาณชั่วขณะของโลหะไทเทเนียม แสดงว่ามีการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion เกิดขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมแม้ในน้ำปราศจากไอออน และเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M ที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ และเกือบคงที่เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะไม่สูงมากนัก แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะถึงแม้ว่าจะอยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ก็ตาม แต่มีสัญญาณชั่วขณะเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งมีจำนวนมากกว่าในน้ำปราศจากไอออน แสดงว่าคลอไรด์ไอออนกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าสูงมากจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้ามีค่า E=0.18 V กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงว่ามี stable pitting corrosion หรือ oxygen evolution เกิดขึ้น แต่เนื่องจากไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในน้ำปราศจากไอออนแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องนี้เกิดจาก stable pitting corrosion (Enos and Scriber, 1997) ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิว แต่ฟิล์มเฉื่อยนี้ไม่เสถียรทำให้เกิดการแตกเฉพาะจุด เกิดเป็น metastable pitting corrosion แม้ในน้ำปราศจากไอออน และคลอไรด์ไอออนในสารละลายสามารถกระตุ้นให้การกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion รุนแรงขึ้นได้ และในเงื่อนไขที่เหมาะสมการกัดกร่อนนี้อาจพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion ได้ จึงกล่าวได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จัดเป็นโลหะที่ไวต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) มากที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ และ โลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ซึ่งอาจจะสามารถอธิบายได้จากการที่เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่ถูกเจือด้วยโลหะอื่น ๆ เช่นโครเมียม และนิกเกิล เมื่อสัมผัสกับอากาศหรือสารละลาย โลหะเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นออกไซด์ของโลหะและสร้างเป็นฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาเพื่อปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อนต่อไป แต่เนื่องจากฟิล์มเฉื่อยนี้ประกอบจากออกไซด์ของโลหะต่างชนิดกัน ทำให้ฟิล์มเฉื่อยมีความไม่ต่อเนื่องกันและไม่เสถียร จึงง่ายต่อการแตกเฉพาะจุด ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไอออนรุนแรงอย่างคลอไรด์ไอออน

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

อภิปรายผลการวิจัย

ในการศึกษาการพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ 3 ชนิด โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า 2 วิธีได้แก่ การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจริง ๆ ของโลหะในสารละลายที่กำหนด แต่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะนั้น ๆ เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาแอโนดิกบนผิวของโลหะ ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบและอัตราเร็วของการกัดกร่อนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเงื่อนไขที่เหมาะสมของโลหะในสารละลายที่กำหนด ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะบริเวณศักย์ไฟฟ้าที่ใกล้กับศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะ รูปแบบการกัดกร่อนที่ได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา แต่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะต้องรบกวนระบบโดยการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกแก่โลหะ ในขณะที่การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาไม่ต้องรบกวนระบบเลย แต่สามารถตรวจหารูปแบบการกัดกร่อนโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นจริง ๆ ได้ ดังนั้นเทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลานี้จึงจัดเป็นการทดสอบโดยไม่ทำลาย (non-destructive technique) ที่น่าจะสามารถพัฒนาไปใช้ในการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันที (real-time corrosion monitoring) ได้ แต่เทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลานี้มีข้อเสียคือ ไม่สามารถบอกอัตราการกัดกร่อนชั่วขณะที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งได้มีงานวิจัยกล่าวว่าสามารถตรวจสอบอัตราการกัดกร่อนชั่วขณะของการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับระบบที่ถูกกัดกร่อนเทียบกับเวลาควบคู่ไปด้วย หรือที่เรียกว่า “การวัดสัญญาณรบกวนทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical noise measurement)” (Xia et al., 2017)

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปแบบการกัดกร่อนที่เป็นไปได้ของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า 2 วิธี ได้แก่การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งทำการศึกษาในน้ำปราศจากไอออน และในสารละลายที่มีไอออนที่กระตุ้นการกัดกร่อนอย่างคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ผลการทดลองจากทั้ง 2 วิธีให้ผลไปในทางเดียวกันว่า วัสดุทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ โลหะแมกนีเซียมจัดเป็นโลหะที่ไวต่อการกัดกร่อนมาก โดยไม่มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะ ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอแม้ในน้ำปราศจากไอออน และการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอนี้จะรุนแรงขึ้นในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ส่วนโลหะไทเทเนียมจัดเป็นโลหะที่มีผิวที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยามากที่สุด เนื่องจากมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวต่อการกัดกร่อน และในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสม ฟิล์มเฉื่อยนี้อาจเกิดการแตกเป็นจุดๆ แต่ไม่บ่อยนัก กลายเป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่แบบ metastable pitting corrosion ที่ไม่รุนแรง เพราะผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนจะค่อยๆ ปกคลุมรอยแตกทำให้รอยแตกปิดสนิทกลายเป็นฟิล์มเฉื่อยอีกครั้ง ส่วนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวเช่นเดียวกับโลหะไทเทเนียม แต่ฟิล์มเฉื่อยของเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ไม่เสถียรทำให้เกิดการแตกเฉพาะจุดได้ง่าย กลายเป็น metastable pitting corrosion ได้แม้อยู่ในน้ำปราศจากไอออน และคลอไรด์ไอออนในสารละลายสามารถกระตุ้นให้การกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion รุนแรงขึ้น และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้เพียงพอกับโลหะนี้ การกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion นี้อาจพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion ที่รุนแรงได้ แสดงว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จัดเป็นโลหะที่ไวต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) นอกจากนี้การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลาเป็นเทคนิคการทดสอบโดยไม่ทำลาย ที่น่าจะสามารถพัฒนาไปเป็นระบบการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันทีได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินสนับสนุนจากโครงการพิเศษของนักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรฟิสิกส์ ภาควิชาพิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

Bard, A.J., Stratmann, M. and Frankel, G.S. (2003). **Encyclopedia of Electrochemistry**. Michigan: Weiley.

Caines S., l Khan, F., Zhang, Y. and Shirokoff, J. (2017). Simplified electrochemical potential noise method to predict corrosion and corrosion rate. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 47, 72-84.

Cottis, R.A. (2006). Sources of Electrochemical noise in corroding systems. **Russian Journal of Electrochemistry**, 42(5), 497-505.

Enos, D.G. and Scribner, L. (1997). **The potentiodynamic polarization scan: Technical report 33**. Hampshire: Solartron.

Fekry, A.M. (2009). The influence of chloride and sulphate ions on the corrosion behavior of Ti and Ti-6Al-4V alloy in oxalic acid. **Electrochimica Acta**, 54, 3480-3489.

Feng, X., Lu, X., Zuo, Yu., Zhuang, N. and Chen, D. (2016). The effect of deformation on metastable pitting of 304 stainless steel in chloride contaminated concrete pore solution. **Corrosion Science**, 103, 223-229.

Inoue, H., Sugahaea, K., Yamamoto, A. and Tsubakino, H. (2001). Corrosion rate of magnesium and its alloys in buffered chloride solutions. **Corrosion Science**, 44, 603-610.

Mallick, P.A. (2010). **Material, Design and Manufacturing for lightweight Vehicles**. Cambridge: Woodhead Publishing.

Palit, G.C. and Elayaperumal, K. (1978). Passivity and pitting of corrosion resistant pure metal Ta, Nb, Ti, Zr Cr and Al in Chloride solution. **Corrosion Science**, 18, 169-179.

Sasaki, K. and Isaacs, H.S. (2004). Origins of Electrochemical noise during pitting corrosion of aluminium. **Journal of Electrochemical society**, 151, 124-133.

Vargel, C. (2004). **Corrosion of aluminium**. Boston: Elsevier, 2004.

Xia, D.-H., Ma, C., Song, S., Ma, L., Wang, J., Gao, Z., and Hu, W. (2017). Assessing atmospheric corrosion of metals by a novel electrochemical sensor combining with a thin insulating net using electrochemical noise technique. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 252, 353–358.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

บทความวิชาการ

การประยุกต์สไปลน์กำลังสามเพื่อประมาณค่าอินทิกรัลจำกัดเขต

สุพจน์ สีบุตร* และพัชรี วงษาสนธิ์
ภาควิชาคณิตศาสตร์ สถิติและคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประเทศไทย.
**Email: supot.s@ubu.ac.th*

รับบทความ: 2 ธันวาคม 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 16 ธันวาคม 2562

บทคัดย่อ

การประมาณค่าอินทิกรัลจำกัดเขตเป็นเรื่องที่นักคณิตศาสตร์ให้ความสนใจศึกษาเรื่องหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับฟังก์ชันที่หาค่าอินทิกรัลเชิงวิเคราะห์ไม่ได้ ซึ่งมีการเสนอหลายวิธีเพื่อใช้ในการประมาณค่าอินทิกรัลจำกัดเขต วิธีการประมาณอินทิกรัลจำกัดเขตวิธีการหนึ่งที่ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ คือ การประมาณฟังก์ชันที่อินทิกรัลเชิงวิเคราะห์ไม่ได้ด้วยฟังก์ชันที่อินทิกรัลเชิงวิเคราะห์ได้ ถ้าฟังก์ชันประมาณเป็นฟังก์ชันที่ดีที่สามารถแทนฟังก์ชันที่ต้องการพิจารณาอินทิกรัลจำกัดเขต แล้วอินทิกรัลจำกัดเขตของฟังก์ชันประมาณก็จะเป็นค่าประมาณที่ดีที่สามารถแทนอินทิกรัลจำกัดเขตของฟังก์ชันที่ต้องการพิจารณาได้ บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการประมาณฟังก์ชันด้วยการประมาณค่าในช่วงโดยใช้สไปลน์กำลังสาม และเพื่อประยุกต์ฟังก์ชันประมาณที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงโดยใช้สไปลน์กำลังสาม เพื่อประมาณอินทิกรัลจำกัดเขตของฟังก์ชัน ในบทความได้นำเสนอการประมาณฟังก์ชันด้วยการประมาณค่าในช่วงโดยใช้สไปลน์กำลังสาม ทั้งฟังก์ชันที่หาค่าอินทิกรัลเชิงวิเคราะห์ได้และหาค่าอินทิกรัลเชิงวิเคราะห์ไม่ได้ เพื่อให้เห็นชัดเจนถึงวิธีการประยุกต์สไปลน์กำลังสามเพื่อประมาณค่าอินทิกรัลจำกัดเขต

คำสำคัญ: สไปลน์กำลังสาม อินทิกรัลจำกัดเขต อินทิกรัลเชิงตัวเลข

อ้างอิงบทความนี้
สุพจน์ สีบุตร และพัชรี วงษาสนธิ์. (2562). การประยุกต์สไปลน์กำลังสามเพื่อประมาณค่าอินทิกรัลจำกัดเขต. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 2(2), 127-136.

ลิขสิทธิ์โดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Academic Article

Applying cubic spline to estimate definite integrals

Supot Seebut* **and Patcharee Wongsason**

Department of Mathematics Statistics and Computers, Ubon Ratchathani University, Thailand.

**Email: supot.s@ubu.ac.th*

Received <2 December 2019>; Accepted <16 December 2019>

Abstract

Evaluating definite integral is of mathematician interests, especially applying with nonintegrable functions. There are various ways to do so and one of them is to evaluate a non-analytic integrable function by using an analytic integrable function. If an estimated function is fairly good, we can replace the evaluating definite integral by the actual definite integral. This work aims to evaluating estimated functions by cubic spline method, its applications and definite integrals of the estimated functions. We also present evaluating functions by estimating them in intervals with cubic spline in both analytic integrable and non-analytic integrable functions to focus clearly on the applications of using cubic spline for definite integrals.

Keywords: interval estimation, cubic spline, definite integral estimation

Cite this article:

Seebut, S. and Wongsason, P. (2019). Applying cubic spline to estimate definite integrals. **Journal of Science and Science Education**, 2(2), 127-136.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Definite Integral and Interval Estimation

Definite integral plays an important role in mathematics and it has applications in various ways (Heinbockel, 2012; Bittinger, Ellenbogen and Surgent, 2015). There is, however, drawback application for the usage of definite integral which is we cannot apply this method to some functions that are non-analytic integrable and hence the actual definite integral cannot be evaluated. So such definite integral has been estimated which was presented earlier (Eldén and Wittmeyer-Koch, 1990; Burden and Faires, 2001; Steven, 2007). One of the good estimations of the definite integral is estimation non-analytic integrable functions by using analytic integrable functions. If the estimated function is good enough so that we can replace a considered function by such an estimated function, then the definite integral of an estimated function is also a good estimation for the considered function.

Estimation of non-analytic integrable functions can be evaluated on a considered interval by using polynomials called polynomial interpolation. To get more accurate in the estimation, higher degree polynomials are needed. However, the higher degrees of polynomials are added, the more errors of estimation occur at the same time. Therefore, the spline interpolation is introduced and its procedure is to divide a closed interval into finite subintervals and then there is a polynomial in each subinterval (Kawamura, Sasaki and Otsuki, 1992; McKinley and Levine, 1998; Giordano, Fox and Horton, 2013). This method will connect piecewise smooth curves and we call this a linear spline interpolation which is the simplest type of spline interpolation but it is not widely used. However, cubic spline interpolation is efficient method due to the continuity of second-order differentiation. This results in a good estimation of a considered function by using the cubic spline interpolation (Burt and Adelson, 1983; Wang, Shen and Teoh, 2000; Kastanek and Nielsen, 2001; Scardapane, Scarpiniti, Comminiello and Uncini, 2017).

This work aims to apply an estimated function from cubic spline interpolation to find a definite integral. We present cubic spline interpolation in both analytic integrable and non-analytic integrable functions to see an application of cubic spline for finding definite integrals.

Cubic spline interpolation

Using polynomials to approximate some functions is of mathematician interests because polynomials have nice properties, namely, integrability and differentiability. The higher degree of polynomials, however, they tend to have more oscillators near the endpoints of the interval than the lower degree ones and then the stability of the approximation cannot be guaranteed properly due to the change of its coefficients. One of the reasons that the lower degree polynomials cannot be used in this method is an approximation of the curve with lower degree polynomials is not fitted properly for some data on the considered intervals, especially, non-quadratic or cubic data.

We present, in this topic, modern and widely used techniques called cubic spline interpolation which uses cubic polynomials to connect in each subinterval.

We present here the cubic spline interpolation from four points of data of a function $f : (x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), (x_3, f(x_3))$ and $(x_4, f(x_4))$

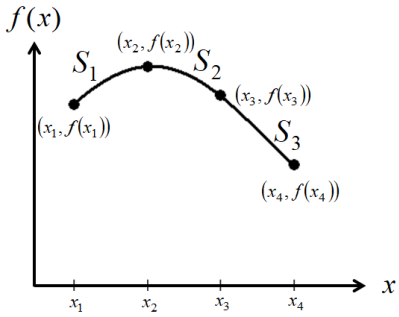


Figure 1. Cubic spline interpolation from four data points

We denote

$$S_1(x) = a_1 + b_1x + c_1x^2 + d_1x^3, x \in [x_1, x_2)$$
$$S_2(x) = a_2 + b_2x + c_2x^2 + d_2x^3, x \in [x_2, x_3)$$
$$S_3(x) = a_3 + b_3x + c_3x^2 + d_3x^3, x \in [x_3, x_4].$$

Condition 1: continuity at points.

Conditions	Equations	Order
$S_1(x_1) = f(x_1)$	$a_1 + b_1x_1 + c_1{x_1}^2 + d_1{x_1}^3 = f(x_1)$	(1)
$S_1(x_2) = f(x_2)$	$a_1 + b_1x_2 + c_1{x_2}^2 + d_1{x_2}^3 = f(x_2)$	(2)
$S_2(x_2) = f(x_2)$	$a_2 + b_2x_2 + c_2{x_2}^2 + d_2{x_2}^3 = f(x_2)$	(3)
$S_2(x_3) = f(x_3)$	$a_2 + b_2x_3 + c_2{x_3}^2 + d_2{x_3}^3 = f(x_3)$	(4)
$S_3(x_3) = f(x_3)$	$a_3 + b_3x_3 + c_3{x_3}^2 + d_3{x_3}^3 = f(x_3)$	(5)
$S_3(x_4) = f(x_4)$	$a_3 + b_3x_4 + c_3{x_4}^2 + d_3{x_4}^3 = f(x_4)$	(6)

Condition 2: continuity of slopes.

Conditions	Equations	Order
$S_1'(x_2) = S_2'(x_2)$	$b_1 + 2c_1x_2 + 3d_1{x_2}^2 - b_2 - 2c_2x_2 - 3d_2{x_2}^2 = 0$	(7)
$S_2'(x_3) = S_3'(x_3)$	$b_2 + 2c_2x_3 + 3d_2{x_3}^2 - b_3 - 2c_3x_3 - 3d_3{x_3}^2 = 0$	(8)

Condition 3: continuity of 2nd derivatives.

Conditions	Equations	Order
$S_1''(x_2) = S_2''(x_2)$	$2c_1 + 6d_1x_2 - 2c_2 - 6d_2x_2 = 0$	(9)
$S_2''(x_3) = S_3''(x_3)$	$2c_2 + 6d_2x_3 - 2c_3 - 6d_3x_3 = 0$	(10)

Condition 4: Known derivative values at the extremities called clamped splines.

Conditions	Equations	Order
$S_1'(x_1) = f'(x_1)$	$b_1 + 2c_1x_1 + 3d_1x_1^2 = f'(x_1)$	(11)
$S_3'(x_4) = f'(x_4)$	$b_3 + 2c_3x_4 + 3d_3x_4^2 = f'(x_4)$	(12)

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Equations (1)-(12) will form linear systems which give coefficients $S_1, S_2,$ and S_3 and they are used to approximate the function $f(x)$ in the closed interval $[x_1, x_4]$.

Cubic spline interpolation for elementary functions

This section demonstrates the estimation of elementary functions using cubic spline interpolation and these demonstrations lead to the approximation of the definite integrals of these functions. We then are able to compare the actual and the approximation values by using cubic spline and so we can see applications of the cubic spline interpolation in the definite integrals of elementary functions on their domains as shown in the below table.

Functions	Domains of Functions
$f(x)=x^4$	$[0,1]$
$f(x)=\sin x$	$[0,\pi/2]$
$f(x)=e^x$	$[0,1]$
$f(x)=\ln x$	$[2,4]$

By the method of cubic spline interpolation, we divide a domain into 3 equally subintervals and this result in four points in the domain and we then obtain an estimated formula that will be used to substitute the actual function. We provide the graphs in both approximated and actual functions on domains as follows:

The approximated formula of $f(x)=x^4$ on $[0,1]$ is

$$x^4 \approx \begin{cases} -0.1111x^2+0.6667x^3; & 0 \le x < 1/3 \\ -0.0494+0.4444x-1.4444x^2+2.0000x^3; & 1/3 \le x < 2/3 \\ -0.4444+2.2222x-4.1111x^2+3.3333x^3; & 2/3 \le x \le 1. \end{cases}$$

Graphs of approximated and actual functions on $[0,1]$ are provided as below:

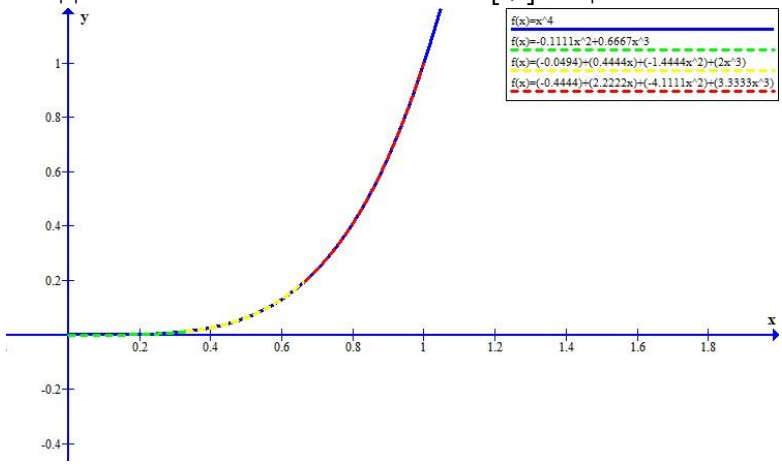


Figure 2. Graphs of $f(x)=x^4$ and approximated functions by using cubic spline interpolation

The approximated formula of $f(x)=\sin x$ on $[0,\pi/2]$ is

$$\sin x \approx \begin{cases} 1.0000x - 0.0651x^2 - 0.0401x^3; & 0 \le x < \pi/6 \\ 0.0638 + 0.6347x + 0.6326x^2 - 0.4843x^3; & \pi/6 \le x < \pi/3 \\ -1.9783 + 6.4847x - 4.9537x^2 + 1.2939x^3; & \pi/3 \le x \le \pi/2. \end{cases}$$

Graphs of approximated and actual functions on $[0, \pi/2]$ are provided as below:

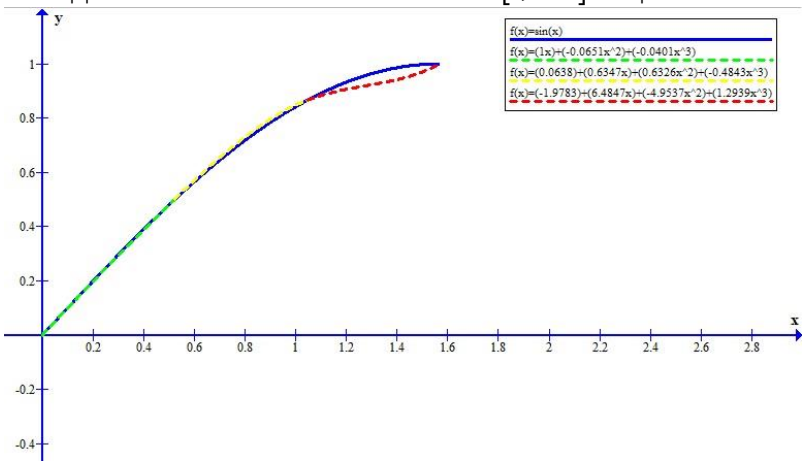


Figure 3. Graphs of $f(x) = \sin x$ and approximated functions by using cubic spline interpolation

The approximated formula of $f(x) = e^x$ on $[0,1]$ is

$$e^x \approx \begin{cases} 1.0000 + 1.0000x + 0.4950x^2 + 0.1965x^3; & 0 \le x < 1/3 \\ 0.9972 + 1.0255x + 0.4185x^2 + 0.2731x^3; & 1/3 \le x < 2/3 \\ 0.9646 + 1.1721x + 0.1986x^2 + 0.3830x^3; & 2/3 \le x \le 1. \end{cases}$$

Graphs of approximated and actual functions on $[0,1]$ are provided as below:

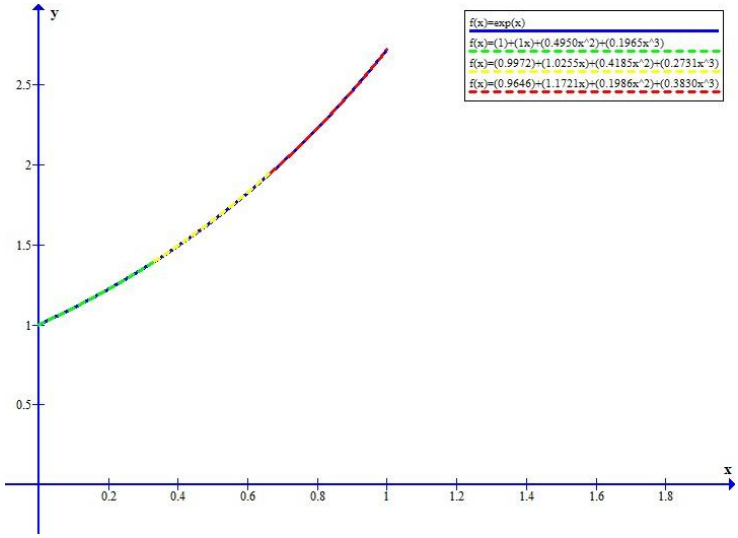


Figure 4. graphs of $f(x) = e^x$ and approximated functions by using cubic spline interpolation

The approximated formula of $f(x) = \ln x$ on $[2,4]$ is

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

$$\ln x \approx \begin{cases} -0.6103 + 0.8236x - 0.0884x^2 + 0.0013x^3; & 2 \le x < 8/3 \\ -0.9385 + 1.1928x - 0.2269x^2 + 0.0186x^3; & 8/3 \le x < 10/3 \\ -0.4179 + 0.7243x - 0.0864x^2 + 0.0045x^3; & 10/3 \le x \le 4. \end{cases}$$

Graphs of approximated and actual functions on $[2,4]$ are provided as below:

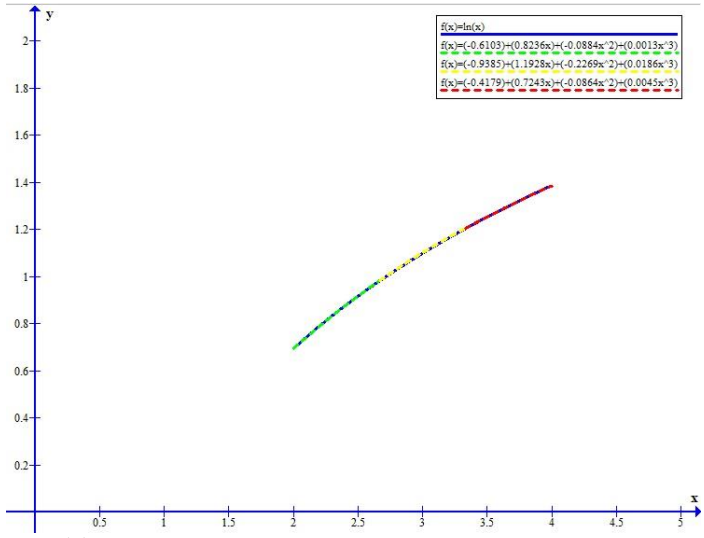


Figure 5. Graph of $f(x) = \ln x$ and approximated functions by using cubic spline interpolation

From the above applications of definite integral results, we can conclude in the following table:

Functions	Domains	Actual values of definite integrals	Approximated values of definite integrals	Relative errors
$f(x) = x^4$	$[0,1]$	0.2000	0.1996	0.2004
$f(x) = \sin x$	$[0, \pi/2]$	1.0000	0.9885	1.1634
$f(x) = e^x$	$[0,1]$	1.7183	1.7182	0.0058
$f(x) = \ln x$	$[2,4]$	2.1589	2.1589	0.0000

We can observe from the table that the relative errors are very small so the results are reasonable and can be applied. In the next section, we present the application of definite integrals using cubic spline interpolation for non-analytic integrable functions.

Cubic spline interpolation for non-analytic integrable functions.

We demonstrate how to make uses of the results from the previous section in order to approximate the definite integrals of non-analytic integrable functions using cubic spline interpolation. We give two examples of non-analytic integrable functions which cannot use other methods easily to do so.

The first one is the approximation formula of $f(x) = e^{x^2}$ on $[0,1]$ which is

$$e^{x^2} \approx \begin{cases} 1.0000 + 0.9378x^2 + 0.3597x^3; & 0 \le x < 1/3 \\ 0.9637 + 0.3264x - 0.0414x^2 + 1.3388x^3; & 1/3 \le x < 2/3 \\ -0.0820 + 5.0323x - 7.1003x^2 + 4.8683x^3; & 2/3 \le x \le 1. \end{cases}$$

Graphs of approximated and actual functions on $[0,1]$ are provided as below:

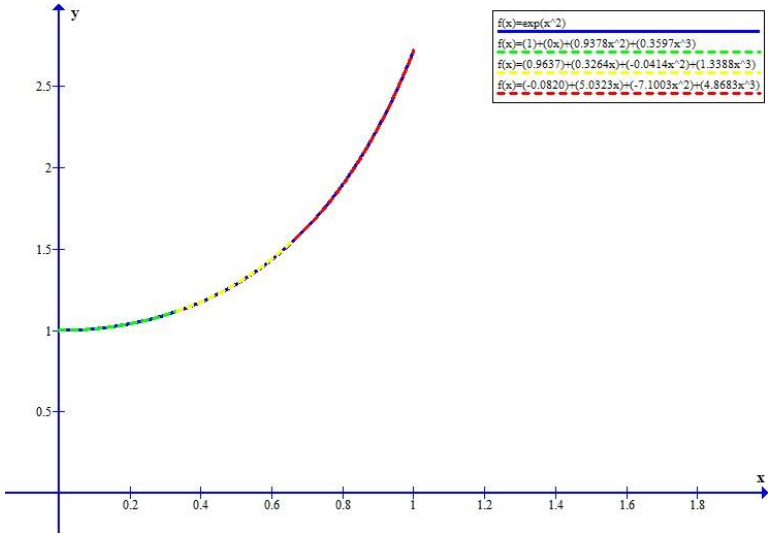


Figure 6. Graphs of $f(x) = e^{x^2}$ and approximated functions by using cubic spline interpolation

The approximated value of definite integrals is about 1.4617 compared to using mathematics software which gives 1.4627 and we consider these two values are closed.

The second function is approximation formula of $f(x) = \cos(x^2)$ on $[0,1]$ which is

$$\cos\left(x^2\right) \approx \begin{cases} 1.0000 + 0.0532x^2 - 0.3262x^3; & 0 \le x < 1/3 \\ 1.0242 - 0.2175x + 0.7057x^2 - 0.9786x^3; & 1/3 \le x < 2/3 \\ 0.9717 + 0.0186x + 0.3515x^2 - 0.8015x^3; & 2/3 \le x \le 1. \end{cases}$$

Graphs of approximated and actual functions on $[0,1]$ are provided as below:

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

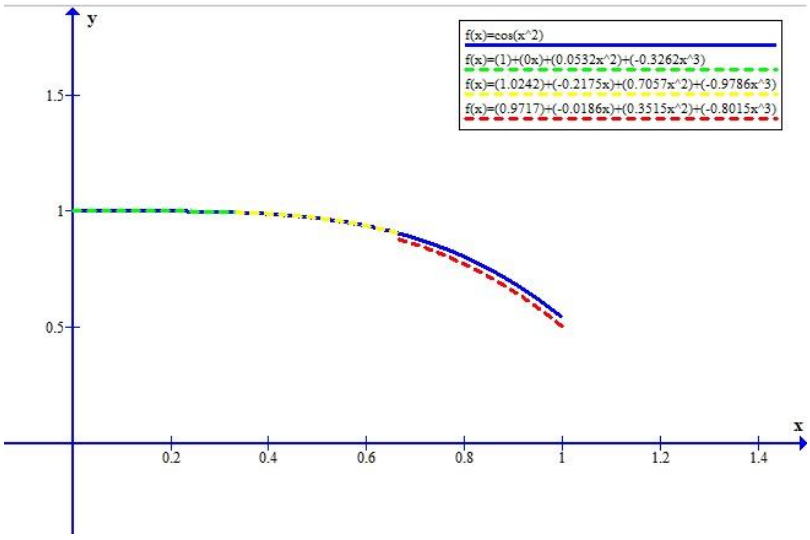


Figure 7. Graphs of $f(x)=\cos(x^2)$ and approximated functions by using cubic spline interpolation

An approximated value of the definite integral is about 0.9045 compared to using mathematics software which gives 0.8942 and we consider these two values are closed.

Summary

Using cubic spline interpolation in an application of definite integrals can be used for both non-analytic and analytic integrable functions. The results show six different functions in which the first four are analytic integrable functions and here are elementary functions and the last two functions are non-analytic integrable functions. The actual and the approximation values yield acceptable small errors so that we can use the approximated values instead of the actual ones. For further studies or other sophisticated non-analytic integrable functions or analytic integrable can be experimented.

References

Bittinger, M. L., Ellenbogen, D. J. and Surgent, S. J. (2015). **Calculus and its applications** (10th ed.). Boston, MA: Pearson Education.

Burden, R. L. and Faires, J. D. (2001). **Numerical Analysis** (7th ed.). Stamford, CT: Thomson Learning.

Burt, P. J. and Adelson, E. H. (1983). A multiresolution spline with application to image mosaics. **ACM transactions on Graphics**, 2(4), 217-236.

Eldén, L. and Wittmeyer-Koch, L. (1990). **Numerical Analysis: An Introduction**. Boston, MA: Academic Press.

Giordano, F. R., Fox, W. P. and Horton, S. B. (2013). **A First Course in Mathematical Modeling** (5th ed.). Ontario: Nelson Education.

Heinbockel, J. H. (2012). **Introduction to Calculus**. Old Dominion University. Retrieved 6 Nov 2019, from http://www.math.odu.edu/~jhh/counter10.html

Kastanek, F. J. and Nielsen, D. R. (2001). Description of soil water characteristics using cubic spline interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, 65(2), 279-283.

Kawamura, H., Sasaki, T. and Otsuki, T. (1992). Spline interpolation method. U.S. Patent No. 5,140,236. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

McKinley, S. and Levine, M. (1998). Cubic spline interpolation. **College of the Redwoods**, 45(1), 1049-1060.

Scardapane, S., Scarpiniti, M., Comminiello, D. and Uncini, A. (2017, June). Learning activation functions from data using cubic spline interpolation. In **Italian Workshop on Neural Networks** (pp. 73-83). Retrieved 6 Nov 2019, from https://arxiv.org/pdf/1605.05509.pdf

Steven, C. C. (2007). **Applied Numerical Methods with Matlab for Engineers and Scientists**. New York: McGraw-Hill Higher Education

Wang, Y., Shen, D. and Teoh, E. K. (2000). Lane detection using spline model. **Pattern Recognition Letters**, 21(8), 677-689.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

บทความวิชาการ

การใช้เลขสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์

สุพจน์ สีบุตร* และพัชรี วงษาสนธิ์
ภาควิชาคณิตศาสตร์ สถิติและคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประเทศไทย
**Email: supot.s@ubu.ac.th*

รับบทความ: 2 ธันวาคม 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 16 ธันวาคม 2562

บทคัดย่อ

การนำคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ทั้งหลายที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนามตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์นั้น มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในทุกด้าน ถ้าหากตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถอธิบายปรากฏการณ์เหล่านั้นได้แม่นยำ การใช้เลขสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์ถือว่าเป็นการสร้างตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์อีกแบบหนึ่งที่มีความสำคัญ และประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอการใช้เลขสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์ มีการอธิบายให้เห็นถึงการใช้เลขสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์เชิงกำหนดและสถานการณ์เชิงความน่าจะเป็นที่ง่ายต่อการเข้าใจ มีการสาธิตการประยุกต์การใช้เลขสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์ในชีวิตประจำวันจริงเกี่ยวกับปัญหาสินค้าคงคลัง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นอีกหนึ่งแนวทางในการนำคณิตศาสตร์ไปประยุกต์ใช้จริงเพื่อช่วยให้การวางแผนจัดการเกี่ยวกับสถานการณ์ทั้งหลายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอาศัยข้อมูลที่มาจากตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

คำสำคัญ: เลขสุ่ม การจำลอง สถานการณ์เชิงกำหนด สถานการณ์เชิงความน่าจะเป็น สินค้าคงคลัง

อ้างอิงบทความนี้
สุพจน์ สีบุตร และพัชรี วงษาสนธิ์. (2562). การใช้เลขสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 2(2), 137-144.

ลิขสิทธิ์โดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Academic Article

Using random numbers to simulate situations

Supot Seebut* **and Patcharee Wongsason**

Department of Mathematics Statistics and Computers, Ubon Ratchathani University, Thailand

**Email: supot.s@ubu.ac.th*

Received <2 December 2019>; Accepted <16 December 2019>

Abstract

Applications on mathematics can be used to explain many phenomena in both science and other areas called mathematical modeling. If such mathematical modeling can explain those phenomena well and be accurate, using random numbers to simulate situations is one of the important mathematical models and also widely used. In this paper, we present using random numbers to simulate determined and probability situations that are easy to understand. We apply the methods in real life situations, namely, warehouse problems. The results show that Mathematics is efficiently used in management in many situations by using relevant mathematical models.

Keywords: Random numbers, simulation, determined situations, probability situation, warehouse

Cite this article:

Seebut, S. and Wongsason, P. (2019). Using random numbers to simulate situations. **Journal of Science and Science Education**, 2(2), 137-144.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Situation simulation

A situation simulation is a method to explain the trend and behavior of the situation by developing mathematical models to observe and test how well the model is. If the situation simulation with the model works efficiently, we then apply further to make decisions in the right direction or the desired ways. Hence, a situation simulation is one of the mathematical tools that help to plan or manage things and then make the best decisions for the work we are working on (Robinson, 1997; Giordano, Fox and Horton, 2013)**.**

Situation simulations were studied and have been developed by Neuman and Ulam to solve problems or obstacles in wars by using Monte Carlo techniques with other knowledge in mathematics to make more efficiently. In real problems, they could not experiment so they tried to manipulate the situations in smaller scales but very close to the real ones. They tested and studied for the manipulated ones to solve the problems (Metropolis, 1987). In recent days, new technologies and computers can be used to model situations in many branches, namely, in business (Badri, 1999; Merkuryev, Petuhova, Van Landeghem, and Vansteenkiste, 2002; Al-Harkan and Hariga, 2007; Lee and Farahmand, 2010; Davis, Eckhause, Peterson, Pouy, Sigalas-Markham, and Volovoi, 2013). Simulated situations have advantages because they cost less than testing in the real ones.

One of the ways to simulate the situations is to use random numbers which use random samples from the situations. The simulated situation will use samples instead of populations in real problems by using probability distribution for random variables in real situations which is the standard way to choose from random numbers. Data from this random number table obey the distribution populations in real situations. There are ways to find random numbers (L'Ecuyer, 1990; Ižaríková, 2015) and recently, the software plays important role to do so. This work presents random numbers to simulate in both determined and probabilistic situations. We also demonstrate how to apply random variables in real lives, namely, warehouse problems and these results in the applications of simulated situations.

Simulating Deterministic Behavior: Area Under a Curve

In this section, we explain how to use random numbers to simulate situations in deterministic behaviors that have no probability and time involved. We demonstrate how to find the area of a function. $y = f(x)$ which is continuous and its values: $0 \le f(x) \le M$ on the close interval $a \le x \le b$ for some real number M. The property of the function can be depicted in the figure 5.2. We observe that the area is rectangular with the height M and the length is $b - a$.

A point $P(x, y)$ is randomly chosen in the rectangular by finding two random numbers that are x and y satisfying $a \le x \le b$ and $0 \le y \le M$. This means that such a random number is P on coordinate x and y. After $P(x, y)$ is chosen, if it is under the curve, the random number in y coordinate satisfies $0 \le y \le f(x)$.

We denote A_C the area under the curve,

A_R the area of the rectangular,

P_C the number of points located under the curve,

P the numbers of all random points.

The approximation of the area under the curve can be computed from the following relation

$$\frac{A_C}{A_R} = \frac{P_C}{P}.$$

The above relation is equivalent to the approximation: $A_C \approx \frac{P_C \cdot A_R}{P}$ shown in figure 1.

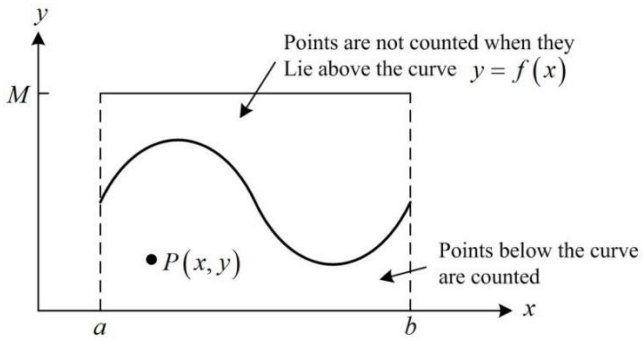


Figure 1. The positive area under $y = f(x)$ on $a \le x \le b$ is contained in the rectangular with the height M and the length $b - a$.

Next, we demonstrate how to use random numbers to find the area under the curve of the function $y = x^2$ on the closed interval $0 \le x \le 1$. A simulated algorithm for finding the area under the curve can be concluded as follows (Applied from Giordano, Fox and Horton, 2013).

Input	all random points are n points in this simulation
Output	the area is equal to the approximation of the area under the curve $y = x^2$ *on* $0 \le x \le 1$ and then $0 \le x^2 \le 1$
Step 1	start with $counter = 0$
Step 2	for $i = 1,2,...,n$ do Step 3-5
Step 3	compute random coordinates x_i y_i satisfying $0 \le x_i \le 1$ and $0 \le y_i \le 1$
Step 4	compute x_i^2 for random x_i
Step 5	if $y_i \le x_i^2$ then add $counter$ by 1. If not, $counter$ does not change
Step 6	compute $Area \approx \frac{(1)(1-0)counter}{n}$
Step 7	OUTPUT (AREA)
STOP	

The result from using Microsoft Excel 2010 can find random numbers to find the area under the curve $y = x^2$, where $0 \le x \le 1$ which has the actual value of $\frac{1}{3} = 0.333...$ as shown in figure 2.

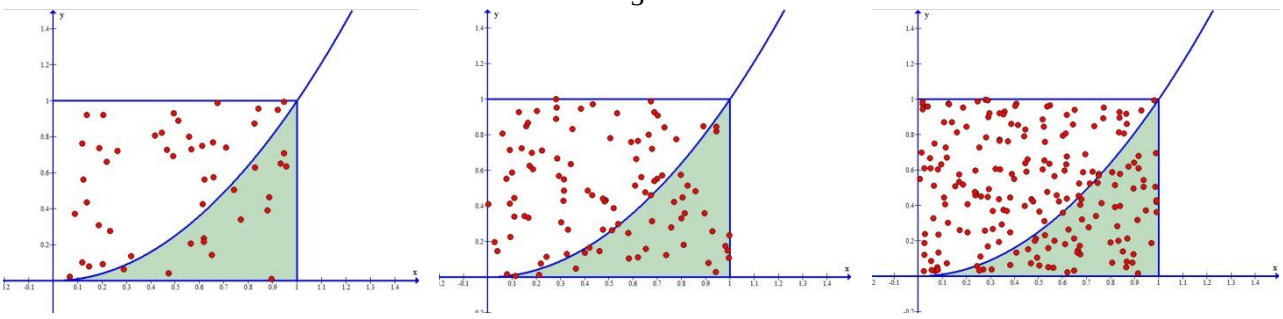


Figure 2. How to use random numbers to simulate situations to find the area under the curve.

From figure 2, the left figure uses 50 random numbers and the approximated area is 0.3. The middle figure uses 100 random numbers and the approximated area is 0.31. The right figure uses 200 random numbers and the approximated area is 0.325. The three figures show the more random numbers increase, the more accurate of the area under the graph is.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Simulating Probabilistic Behavior: Roll of a Fair Dice

To use random numbers for simulating the probabilistic situations, first of all, we must understand the probability. Probability is the subject that studies how the situations randomly happen or how can we measure in numbers of the possibility of the occurrence of situations. For example, the numbers are small, the events rarely happen but the numbers are large, the events or the situations are most likely happen. It can be viewed as long term average, for example, if the time is long, the probability can be measured in ratio.

We denote n_E the numbers of events or situations we are interested in,

n_S the numbers of all events.

The probability of interested events is n_E / n_S.

This topic aims to demonstrate how random numbers can be used to simulate the probabilistic behaviors by considering rolling a fair dice.

Rolling a fair dice, we consider six events because the labels of the dice are $\{1,2,3,4,5,6\}$ and the probability of each score is equally which is $1/6$.

We denote n_D the number of elements in the set $\{1,2,3,4,5,6\}$,

n_T the numbers of all trials.

The probability of each score is n_D / n_T.

In rolling the dice, we will not do it for real, but we will use random numbers instead to simulate the situation as shown by the following algorithm (Applied from Giordano, Fox and Horton, 2013).

Input	The all random numbers n in simulation
Output	The probability of occurring scores $\{1,2,3,4,5,6\}$
Step 1	*Start* $counter1$ *to* $counter6$ *is* 0
Step 2	For $i = 1,2,...,n$ do Step 3-4
Step 3	Randomly choose $0 \le x_i \le 1$
Step 4	If x_i is in this interval, we add $counter$ properly
	$0 \le x_i \le 1/6$ $counter1 = counter1 + 1$
	$1/6 < x_i \le 2/6$ $counter2 = counter2 + 1$
	$2/6 < x_i \le 3/6$ $counter3 = counter3 + 1$
	$3/6 < x_i \le 4/6$ $counter4 = counter4 + 1$
	$4/6 < x_i \le 5/6$ $counter5 = counter5 + 1$
	$5/6 < x_i \le 1$ $counter1 = counter1 + 1$
Step 5	The probability of occurring scores $j = \{1,2,3,4,5,6\}$ is $counter\ j / n$
Step 6	Output *the probability*
STOP	

The result by using Microsoft Excel 2010 to use random numbers for simulating the probability of occurring scores for rolling a fair dice can be concluded as follows:

Scores	Probability for simulating			Theoretical probability
	100 times	1,000 times	10,000 times	
1	0.180	0.159	0.167	0.617
2	0.160	0.173	0.176	0.617
3	0.130	0.187	0.164	0.617
4	0.130	0.155	0.159	0.617
5	0.140	0.182	0.169	0.617
6	0.260	0.144	0.165	0.617

The results by using random numbers in rolling dice show that the more we have trails, the more accuracy of the probability close to the theoretical ones.

Simulating Inventory Problems: Ice Demand Quantity

In this example, we present application of using random numbers to simulate the situations in real lives in warehouse problems and then the result can point out clearly how to apply the application of mathematics. The situation is to simulate the quantity of ice in the restaurant daily. Ice is not easy to keep it and we try to use wisely to save money so for this simulation, we collect data as the following table.

4	8	4	13	11	7	4	11	3	11
5	12	11	3	5	12	6	11	13	8
5	12	3	9	5	5	6	11	12	12
3	12	10	7	10	3	17	6	12	14
6	5	14	4	13	13	5	3	14	13
5	9	17	6	17	8	13	2	15	15

From the data, we find the frequency distribution, frequency, relative frequency, cumulative relative frequency and determine interval random numbers:

Ice quantity (unit : bag)	frequency	Relative frequency	Cumulative relative frequency	Interval random numbers
2-5	19	0.32	0.32	$0 \le x \le 0.32$
6-9	12	0.20	0.52	$0.32 < x \le 0.52$
10-13	21	0.35	0.87	$0.52 < x \le 0.87$
14-17	8	0.13	1.00	$0.87 < x \le 1$

Determine the median in each interval for the quantity of ice q satisfying cumulative relative frequency to find interval random numbers x which give the corresponding values in the below table:

x	0	0.32	0.52	0.87	1
q	2	3.5	7.5	11.5	15.5

The linear equation below explains to find the ice quantity when q and random numbers x on the intervals are given:

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Interval of random numbers	Ice quantity
$0 \le x \le 0.32$	$q = 4.6875x + 2$
$0.32 < x \le 0.52$	$q = 20x - 2.9$
$0.52 < x \le 0.87$	$q = 11.4286x + 1.5571$
$0.87 < x \le 1$	$q = 30.7692x - 15.2692$

From the equations, we find the graphs for using random numbers with warehouse problems which here are the ice quantity as shown the figure 3:

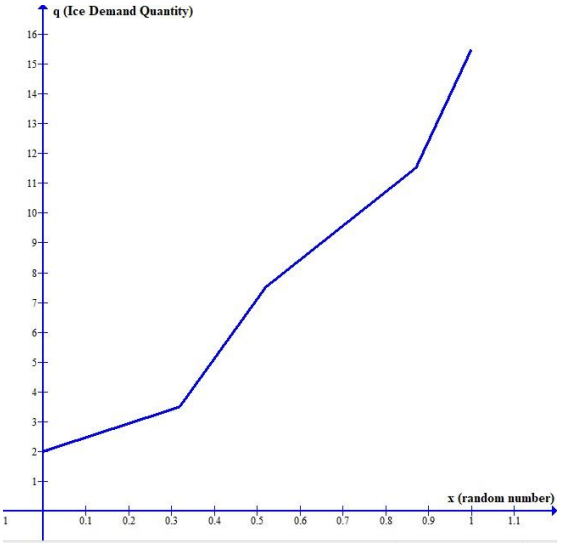


Figure 3. Graph for using random numbers with warehouse problems in the case of using ice. If wanting to know the ice quantity daily, we can find the random numbers and then consider how much those numbers give the ice quantity. The simulated ice quantity is the desired ice quantity daily.

From the graph for using random numbers with warehouse problems in the case of using ice, If wanting to know the ice quantity daily, we can find the random numbers and then consider how much those numbers give the ice quantity. The simulated ice quantity is the desired ice quantity daily. This process can conclude in an algorithm to explain random numbers in warehouse problems with ice quantity (Applied from Giordano, Fox and Horton, 2013).

Input Total random number n in simulation process
Output Ice quantity q_i
Step 1 For $i = 1,2,...,n$ do Step 2-3
Step 2 Find random numbers $0 \le x_i \le 1$
Step 3 If x_i is in this interval, then add and calculate q_i properly
if $0 \le x_i \le 0.32$ then $q_i = 4.6875\,x_i + 2$
if $0.32 < x_i \le 0.52$ then $q_i = 20\,x_i - 2.9$
if $0.52 < x_i \le 0.87$ then $q_i = 11.4286\,x_i + 1.5571$
if $0.87 < x_i \le 1$ then $q_i = 30.7692\,x_i - 15.2692$
Step 4 Output print q_i for $i = 1,2,...,n$
STOP

We will simulate the situation with ice quantity in five days, the results using Microsoft Excel 2010 can be shown on the below table:

Random number	Ice quantity from the simulation by using random numbers (unit: bags)
0.55	8
0.62	9
0.08	2
0.26	3
0.71	10

In the application point of view, we can use results from simulation directly which is preparing ice for five days using the quantity in bags 8, 9, 2, 3, and 10, respectively or we can simulate the situation more than five days to find averages for preparing ice.

Summary

Using random numbers to simulate situations is one of the mathematical applications to see and resolve the problems in real lives or problems with large scales that cannot be evaluated directly. If results from simulations work properly meaning that they are closed to real situations and they can be applied to study further behaviors of the real ones. This leads to efficiently simulate more sophisticated problems. This work has presented using random numbers in both deterministic and probabilistic situations. Moreover, we demonstrate how to simulate the situations in real life to study and resolve real problems. The results provide great advantages for further or more complicated problems.

References

Al-Harkan, I. and Hariga, M. (2007). A simulation optimization solution to the inventory continuous review problem with lot size dependent lead time. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 32(2), 327-338.

Badri, M. A. (1999). A simulation model for multi-product inventory control management. **Simulation**, 72(1), 20-32.

Davis, E. R., Eckhause, J. M., Peterson, D. K., Pouy, M. R., Sigalas-Markham, S. M. and Volovoi, V. (2013). Exploring how hierarchical modeling and simulation can improve organizational resourcing decisions. In **Proceedings of the Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World** (pp. 2496-2507). Piscataway, NJ: IEEE Press.

Giordano, F. R., Fox, W. P. and Horton, S. B. (2013). A first course in mathematical modeling. Nelson Education.

Ižaríková, G. (2015). Process simulation and method of generating random numbers. **International Scientific Journal about Simulation**, 1(2), 1-4.

L'Ecuyer, P. (1990). Random numbers for simulation. **Communications of the ACM**, 33(10), 85-97.

Lee, E. and Farahmand, K. (2010). Simulation of a base stock inventory management system integrated with transportation strategies of a logistic network. In **Proceedings of the Winter Simulation Conference** (pp. 1934-1945). Piscataway, NJ: IEEE Press.

Merkuryev, Y. A., Petuhova, J. J., Van Landeghem, R. and Vansteenkiste, S. (2002). Simulation-based analysis of the bullwhip effect under different information sharing strategies. In **Proceedings of European Simulation Symposium** (Vol. 299). Piscataway, NJ: IEEE Press.

Metropolis, N. (1987). The beginning of the Monte Carlo method. **Los Alamos Science**, 15(584), 125-130.

Robinson, S. (1997). Simulation model verification and validation: increasing the users' confidence. In **Proceedings of the Winter Simulation Conference** (pp. 53-59). Washington, DC: IEEE Computer Society.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

บทความวิจัย

การพัฒนาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่อง อัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL

ปิยะดา ลื่นกลาง[1] พรพิทักษ์ เห็มบาสัตย์[2] และวรรณพล พิมพะสาลี[3,*]

[1]หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

[2]สาขาวิชานวัตกรรมเพื่อการพัฒนาท้องถิ่น คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

[3]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

**Email: pwannapol@yahoo.com*

รับบทความ: 18 มิถุนายน 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 04 สิงหาคม 2562

บทคัดย่อ

การแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์เป็นทักษะพื้นฐานสำหรับนักเรียนในทุกระดับชั้น วิธีการหนึ่งที่รู้จักกันแพร่หลายที่ช่วยฝึกนักเรียนแก้โจทย์ปัญหา โดยเน้นขั้นตอนการคิดของนักเรียน คือ การฝึกให้นักเรียนมีทักษะการแก้ปัญหาตามเทคนิค KWDL ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1. ศึกษาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL 2. เปรียบเทียบทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ เป็นนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โรงเรียนกมลาไสย อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2561 จำนวน 39 คน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL และแบบทดสอบวัดทักษะการแก้โจทย์ปัญหา สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ t-test ผลการวิจัยพบว่า 1. ผลสัมฤทธิ์ของทักษะการแก้โจทย์ปัญหาของนักเรียนคิดเป็นร้อยละ 69.85 ($\bar{X}$=13.97, S.D.=1.06) 2. ทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนโดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

คำสำคัญ: เทคนิค STAD เทคนิค KWDL ทักษะการแก้โจทย์ปัญหา

อ้างอิงบทความนี้

ปิยะดา ลื่นกลาง พรพิทักษ์ เห็มบาสัตย์ และวรรณพล พิมพะสาลี. (2562). การพัฒนาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่อง อัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL. **วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา**, 2(2), 145-153.

ลิขสิทธิ์โดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Research Article

The development of problem-solving skill in ratios and percentages for Grade-8 students by incorporating cooperative learning STAD technique into KWDL technique

Piyada Luenklang[1] Ponpitak Hembasat[2] and Wannapol Pimpasalee[3,*]

[1]Bachelor of Education Program in Mathematics, Kalasin University

[2]Department of Innovation for Local Development, Faculty of Liberal Arts, Kalasin University

[3]Department of Science and Mathematics, Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University

** Email: pwannapol@yahoo.com*

Received <18 June 2019>; Accepted <04 August 2019>

Abstract

Solving mathematical problems is a basic skill for students at all educational level. One of the most popular ways to train a student to solve a problem by emphasizing the thinking process of the students is to train the students with problem-solving skills based on KWDL technique. By this reason, the purpose of this study were to: 1. study the students' problem- solving skills in ratios and percentages for grade-8 students with STAD technique into KWDL technique, 2. compare the students' problem-solving skills in ratios and percentages for grade-8 students before and after studying with STAD technique into KWDL technique. The samples of this study were 39 grade-8 students at Kamalasai School, Kamalasai district, Kalasin province studying in the first semester of the academic year 2018. Instruments were instructional plans based on incorporating STAD technique into KWDL technique and evaluation form on analytical problem- solving skills. Data were analyzed using percentage, mean, standard deviation and t-test. The results of the study were as follows: 1. the percentage of students' problem-solving skills outcome was 69.85 ($\bar{x}$=13.97, S.D.=1.06), 2. the students' posttest of problem-solving skills in ratios and percentages studied by incorporating STAD technique into KWDL technique was significantly higher than the pretest with statistically significant at the 0.01 level.

Keywords: STAD technique, KWDL technique, problem-solving skills

Cite this article:

Luenklang, P., Hembasat, P. and Pimpasalee, W. (2019). The development of problem-solving skill in ratios and percentages for Grade-8 students by incorporating cooperative learning STAD technique into KWDL technique (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 2(2), 145-153.

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

บทนำ

การศึกษาเป็นรากฐานที่สำคัญของการพัฒนาประเทศ เพราะการศึกษาเป็นสิ่งที่ช่วยขัดเกลาให้ เยาวชนเป็นทั้งผู้มีความรู้ความสามารถและดำรงตนให้อยู่ในสังคมได้อย่างมีความสุข รวมถึงเป็นคนดีของสังคมซึ่งสอดคล้องกับนโยบายในการจัดหลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐานที่กำหนดไว้ในรัฐธรรมนูญ บุคคลย่อมมีสิทธิเสมอกันในการรับการศึกษาไม่น้อยกว่า 12 ปีที่รัฐจะต้องจัดให้อย่างทั่วถึงอย่างมีคุณภาพโดยไม่เก็บค่าใช้จ่าย การศึกษาทางเลือกของประชาชน การเรียนรู้ด้วยตนเอง และการเรียนรู้ตลอดชีวิต ย่อมได้รับความคุ้มครองและเหมาะสมที่ได้รับจากรัฐ ดังนั้นการพัฒนาการศึกษาต้องมุ่งพัฒนาผู้เรียนให้พัฒนาเต็มศักยภาพของตนให้เป็นบุคคลแห่งการเรียนรู้หรือสร้างความรู้ได้ด้วยตนเอง แนวการจัดการเรียนการสอนใหม่จึงมุ่งเน้นการลงมือปฏิบัติให้สอดคล้องกับชีวิตจริงโดยการใช้เครือข่ายการเรียนรู้ที่มีอยู่รอบตัว ซึ่งผู้เรียนสามารถสร้าง การแลกเปลี่ยนถ่ายทอด และกระจายความรู้สู่กันและกันได้อย่างกว้างขวาง ต่อเนื่องตลอดชีวิตโดยมีผู้สอนเป็นผู้ชี้แนะแนวทาง หรือสนับสนุนส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น บทบาทของผู้สอนและผู้เรียนจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องเปิดโอกาสให้นักเรียนทุกคนสามารถคิดเป็น ทำเป็น มีเหตุผล มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ สามารถเรียนรู้ได้ตลอดชีวิต รู้เท่าทันโลกเพื่อพร้อมรับการเปลี่ยนแปลงสามารถสั่งสมทุนทางปัญญา

คณิตศาสตร์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาความคิดของมนุษย์ทำให้มนุษย์มีความคิดสร้างสรรค์ คิดอย่างมีเหตุผล เป็นระบบมีแบบแผน สามารถวิเคราะห์ปัญหาหรือสถานการณ์ได้อย่างถี่ถ้วน รอบคอบ ช่วยให้คาดการณ์ วางแผนตัดสินใจ แก้ปัญหา และนำไปใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม นอกจากนี้คณิตศาสตร์ยังเป็นเครื่องมือในการศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและศาสตร์อื่นๆ คณิตศาสตร์จึงมีประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิต ช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิตให้ดีขึ้นและสามารถอยู่ร่วมกับผู้อื่นได้อย่างมีความสุข (Ministry of Education, 2010) ซึ่งสอดคล้องกับที่ Someprayoon (1998) กล่าวไว้ว่าคณิตศาสตร์เป็นวิชาที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อทุกคน ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และจำเป็นมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต เพราะคณิตศาสตร์นอกจากจะเป็นเครื่องมือสำหรับการดำรงชีวิตประจำวันและเป็นพื้นฐานในการเรียนรู้ทั่วไปของวิทยาการแขนงต่างๆ ซึ่งทักษะการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์นั้นเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่ควรปลูกฝังตั้งแต่เด็ก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Eisenmann *et al*. (2015) ที่ได้ทำการศึกษาการพัฒนาทักษะการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์กับนักเรียน 62 คนที่มีอายุระหว่าง 12-18 ปีผ่านกลยุทธฮิวริสติก พบว่า นักเรียนมีพัฒนาการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์ดีขึ้น นอกจากเทคนิคที่กล่าวมาข้างต้นยังมีเทคนิคการสอนอีกหลายเทคนิค โดย Salae, Pakapongpun and Dokchan (2018) ได้ทำการศึกษาการจัดการเรียนรู้ด้วยเทคนิค KWDL เรื่องค่ากลางของข้อมูล ที่มีต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและความสามารถในการสื่อสารทางคณิตศาสตร์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ผลการศึกษาพบว่า นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้ด้วยเทคนิค KWDL มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงกว่านักเรียนมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้ด้วยเทคนิค KWDL เรื่องค่ากลางของข้อมูลของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 อยู่ในระดับมากขึ้นไป สำหรับ Shinno and Sriprom (2014) ก็ได้ศึกษาการพัฒนากิจกรรมการเรียนรู้แบบร่วมมือโดยใช้รูปแบบแบ่งกลุ่มผลสัมฤทธิ์ (STAD) ร่วมกับกระบวนการสร้างตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ พฤติกรรมการทำงานกลุ่ม และเจตคติต่อวิชาคณิตศาสตร์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ซึ่งพบว่านักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ที่ได้รับการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบร่วมมือโดยใช้รูปแบบแบ่งกลุ่มผลสัมฤทธิ์ (STAD) ร่วมกับกระบวนการสร้างตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ มีเจตคติต่อวิชาคณิตศาสตร์หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

วิธีการสอนโดยใช้การเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD คือ รูปแบบการจัดการเรียนการสอนแบบร่วมมือกันเรียนรู้อีกรูปแบบหนึ่ง ที่มีชื่อเต็มว่า Student Teams Achievement Divisions เป็นการจัดกิจกรรมการเรียนการสอน ซึ่งกำหนดให้นักเรียนที่มีความสามารถแตกต่างกัน ทำงานร่วมกันเป็นกลุ่มๆ ละ 4-5 คน ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนที่เรียนเก่ง 1 คน นักเรียนที่เรียนปานกลาง 2-3 คน และนักเรียนที่เรียนอ่อน 1 คน

การสอนแบบเทคนิค KWDL ได้พัฒนาขึ้นโดย Ogle (1986) เพื่อใช้สอนและฝึกทักษะทางการอ่าน และต่อมาได้พัฒนาให้สมบูรณ์ขึ้น โดยเพิ่มการเขียนผังสัมพันธ์ทางความหมาย (Semantic Mapping) สรุปเรื่องที่อ่าน และมีการนำเสนอเรื่องจากผังอันเป็นการพัฒนาทักษะการเขียนและพูด นอกเหนือไปจากทักษะการฟัง และการอ่าน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการสอนทักษะภาษา แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียนวิชาอื่น ๆ ที่มีการอ่านเพื่อทำความเข้าใจ เช่น วิชาสังคมศึกษา วิทยาศาสตร์

คณิตศาสตร์ เป็นต้น เพราะว่าผู้เรียนจะได้รับการฝึกให้ตระหนักในกระบวนการการทำความเข้าใจตนเอง การวางแผน การตั้งจุดมุ่งหมาย ตรวจสอบความเข้าใจในตนเอง การจัดระบบข้อมูล เพื่อดึงมาใช้ภายหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีประโยชน์ในการฝึกทักษะการอ่าน คิดวิเคราะห์ เขียนสรุป และนำเสนอ โดยมีขั้นตอนการเรียนการสอน 4 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นที่ 1 K (What we know) นักเรียนรู้อะไรบ้างในเรื่องที่จะเรียนหรือสิ่งที่โจทย์บอกให้ทราบมีอะไรบ้าง ขั้นที่ 2 W (What we want to know) นักเรียนหาสิ่งที่โจทย์ต้องการทราบหรือสิ่งที่นักเรียนต้องการรู้ ขั้นที่ 3 D (What we do to find out) นักเรียนจะต้องทำอะไรบ้างเพื่อหาคำตอบตามที่โจทย์ต้องการ หรือสิ่งที่ตนเองต้องการรู้ ขั้นที่ 4 L (What we learned) นักเรียนสรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

โรงเรียนกมลาไสย อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ มีการจัดการเรียนการสอนในกลุ่มสาระการเรียนรู้คณิตศาสตร์ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 จำนวน 10 ห้องเรียน ในการจัดการเรียนการสอนที่ผ่านมาพบว่า นักเรียนส่วนใหญ่มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนต่ำ ทั้งนี้เกิดจากสาเหตุสำคัญ คือผู้เรียนไม่สนใจเรียน และวิเคราะห์โจทย์ปัญหาไม่เป็นจึงเป็นเหตุให้ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนต่ำ โดยเฉพาะการวิเคราะห์โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ครูวิชาการและครูผู้สอนคณิตศาสตร์ของโรงเรียนมีความเห็นตรงกันว่านักเรียนมีปัญหามากที่สุด จึงเป็นปัญหาที่ควรได้รับการแก้ไขหรือพัฒนาโดยเร่งด่วน

จากความสำคัญที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โรงเรียนกมลาไสย อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยใช้การเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL เพื่อมุ่งให้ผู้เรียนมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับ เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าการที่ผู้เรียนได้เรียนรู้จากการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL จะทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจและสนุกสนานในการเรียนรู้มีเจตคติที่ดีต่อวิชาคณิตศาสตร์ ตลอดจนส่งเสริมผู้เรียนให้มีโอกาสพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและเกิดการเรียนรู้ได้อย่างเต็มศักยภาพ และนำความรู้ไปเชื่อมโยงการเรียนคณิตศาสตร์ในเรื่องต่อไปตลอดไปถึงการเพิ่มผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL

2. เพื่อเปรียบเทียบทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบบแผนการวิจัย การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้แผนการวิจัยแบบกลุ่มเดียวทดสอบก่อนและหลังเรียน

2. ประชากรและกลุ่มเป้าหมายในการวิจัย

2.1 ประชากร ประชากรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2561 โรงเรียนกมลาไสย อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์

2.2 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 จำนวน 39 คน ที่กำลังศึกษาในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2561 โรงเรียนกมลาไสย อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยการสุ่มตัวอย่างอย่างง่าย (simple random sampling)

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1 แผนการจัดการเรียนรู้โดยการเรียนแบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL โดยการสร้างแผนการจัดการเรียนรู้การแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 มีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ศึกษาหลักสูตร คู่มือครู หนังสือแบบเรียนวิชาคณิตศาสตร์ เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 รหัสวิชา ค22101 องค์ประกอบของแผนการจัดการเรียนรู้

3.1.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเนื้อหากับจุดประสงค์การเรียนรู้

3.1.3 เขียนแผนการจัดการเรียนรู้ตามหลักการและขั้นตอนของการเขียนแผนการจัดการเรียนรู้จำนวน 7 แผน ซึ่งในแต่ละแผนการจัดการเรียนรู้จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง สาระสำคัญ จุดประสงค์การเรียนรู้

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

สาระการเรียนรู้ กิจกรรมการเรียนรู้ สื่อการเรียนรู้หรือแหล่งการเรียนรู้ และการวัดผลและประเมินผล ซึ่งมีขั้นตอนในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ดังนี้

3.1.3.1 ขั้นจัดผู้เรียนเข้ากลุ่มคละความสามารถ ดำเนินการดังนี้

1) ทบทวนความรู้เดิมให้กับนักเรียนแต่ละคน โดยการจัดกิจกรรมจับคู่บัตรคำตอบ

2) ครูแบ่งกลุ่มนักเรียนออกเป็นกลุ่มย่อย กลุ่มละ 4-5 คน โดยแต่ละกลุ่ม นักเรียนคละความสามารถเป็นคนเก่ง 1 คน ปานกลาง 2 คน อ่อน 2 คน และให้แต่ละกลุ่มตั้งชื่อกลุ่มของตนเอง

3) ครูแจ้งวิธีการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ให้เข้าใจอีกครั้งว่าสมาชิกทุกคนต้องมีบทบาทหน้าที่รับผิดชอบ คอยช่วยเหลือและแลกเปลี่ยนความรู้ซึ่งกันและกัน หลังจากนั้นครูทำการสอนเนื้อหาใหม่โดยการยกตัวอย่างโจทย์แล้วให้นักเรียนร่วมกันวิเคราะห์โจทย์โดยใช้เทคนิค KWDL ได้แก่ ขั้นที่ 1 K (What we know) สิ่งที่โจทย์บอกให้ทราบมีอะไรบ้าง ขั้นที่ 2 W (What we want to know) สิ่งที่โจทย์ต้องการทราบคืออะไร ขั้นที่ 3 D (What we do to find out) จะต้องทำอะไรบ้างเพื่อหาคำตอบตามที่โจทย์ต้องการ และขั้นที่ 4 L (What we learned) สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

3.1.3.2 ขั้นกิจกรรมกลุ่ม ครูแจกใบความรู้ให้นักเรียนแต่ละกลุ่ม ให้ระดมสมองและช่วยกันวิเคราะห์และเขียนลงในใบความรู้ โดยใช้เทคนิค KWDL ดังนี้

1) นักเรียนช่วยกันคิดว่าโจทย์ให้ข้อมูลอะไรกับนักเรียนบ้าง (ขั้น K)

2) นักเรียนอภิปรายกันกลุ่มว่าคำตอบที่โจทย์ต้องการคืออะไร พร้อมเสนอวิธีแก้ปัญหา (ขั้น W)

3) นักเรียนดำเนินการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีที่ได้เสนอไว้ (ขั้น D)

4) นักเรียนนำเสนอข้อสรุปที่ได้จากการแก้ปัญหา (ขั้น L)

หลังจากนั้นให้ตัวแทนแต่ละกลุ่มออกมานำเสนอสิ่งที่ได้ทำในใบความรู้ และให้เพื่อน ๆ ในชั้นเรียนช่วยกันซักถามและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างกลุ่ม

3.1.3.3 ขั้นทดสอบ ดำเนินการดังนี้ (1) ครูแจกแบบทดสอบให้นักเรียนคนละ 1 ชุด (2) นักเรียนแต่ละคนทำแบบทดสอบโดยไม่ปรึกษากัน (3) เมื่อทำแบบทดสอบเสร็จแล้ว ให้นักเรียนเปลี่ยนกระดาษคำตอบเพื่อสลับกันตรวจ (4) ครูและนักเรียนร่วมกันเฉลยคำตอบ พร้อมกับชมเชยผู้ที่ได้คะแนนสูงสุด (5) นำคะแนนของทุกคนในกลุ่มมารวมกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยเป็นคะแนนของกลุ่มเพื่อไปเทียบกับเกณฑ์ที่ตั้งไว้ และ (6) เก็บคะแนนจริงของนักเรียนแต่ละคนเป็นผลทดสอบย่อยของบทเรียน

3.1.3.4 ขั้นสรุป ดำเนินการโดยให้นักเรียนร่วมกันอภิปรายให้ได้ข้อสรุป จากการทำกิจกรรมและการนำเสนอหน้าชั้นเรียน ตามสาระสำคัญและครูให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

3.1.4 นำแผนการจัดการเรียนรู้ให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ขององค์ประกอบ หลังจากนั้นนำแผนการจัดการเรียนรู้ที่ผู้เชี่ยวชาญเสนอแนะมาปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นและจัดพิมพ์เพื่อใช้ประกอบการสอนต่อไป

3.2 แบบทดสอบวัดทักษะในการแก้โจทย์ปัญหา เรื่อง อัตราส่วนและร้อยละ ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้าง ดังนี้

3.2.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบทดสอบวัดทักษะในการแก้โจทย์เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ

3.2.2 สร้างแบบทดสอบวัดทักษะในการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ จำนวน 30 ข้อ

3.2.3 นำแบบทดสอบเสนอผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 คน เพื่อตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับนิยามประเด็นหลักแล้วนำมาหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับศัพท์เฉพาะ IOC (Index of Item Object Congruence) เพื่อตรวจสอบ พิจารณาความเที่ยงตรงเชิงโครงสร้างและเนื้อหาโดยพิจารณาความสอดคล้องระหว่าง ข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ ของการเรียนค่าดัชนีความสอดคล้องที่ยอมรับได้ต้องมีค่าตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป

3.2.4 นำแบบทดสอบวัดทักษะในการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ที่ผ่านการพิจารณาความสอดคล้องจากผู้เชี่ยวชาญ ไปทดลองใช้ (Try out) กับนักเรียนจำนวน 46 คน ที่เคยเรียนเนื้อหาเรื่องการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ มาแล้วนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอบ มาหาคุณภาพของข้อสอบ โดยการหาค่าความยาก (p) และค่าอำนาจจำแนก (r) เป็นรายข้อ คัดเลือกข้อสอบไว้ จำนวน 20 ข้อ โดยเลือกข้อสอบที่มีค่าความยากตั้งแต่ 0.20–0.80 และมีค่า

อำนาจจำแนก ตั้งแต่ 0.20–1.00 แล้วจัดพิมพ์แบบทดสอบวัดทักษะในการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ฉบับจริงที่ผ่านการตรวจคุณภาพแล้ว เพื่อนำไปใช้กับกลุ่มเป้าหมายต่อไป

4. ขั้นตอนในการทดลอง

4.1 ก่อนการทดลองโดยใช้กิจกรรมการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL ผู้วิจัยทำการทดสอบวัดความรู้ เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ จำนวน 20 ข้อ เพื่อเก็บข้อมูลไว้เปรียบเทียบกับคะแนนที่วัดได้จากการทดสอบหลังการจัดการเรียนรู้

4.2 ผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดการเรียนรู้ตามแผนการจัดการเรียนรู้ โดยใช้กระบวนการเรียนรู้จากประสบการณ์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น จำนวน 7 แผน แผนละ 50 นาที รวม 7 วัน โดยให้นักเรียนได้เรียนรู้ตามการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL โดยในการเรียนรู้ในแต่ละแผนนักเรียนปฏิบัติกิจกรรมการเรียนรู้เป็นกลุ่มย่อยตามที่ได้กล่าวไว้ในการสร้างแผนการเรียนรู้ในหัวข้อ 3.1.3 รวมทั้งทำการประเมินพฤติกรรมการทำงานกลุ่มตาม แบบสังเกตพฤติกรรมการทำงานกลุ่มโดยผู้วิจัย ตัวผู้เรียน และเพื่อนนักเรียนในกลุ่ม

ตารางที่ 1 กำหนดการจัดการเรียนรู้ตามแผนการจัดการเรียนรู้และพฤติกรรมของนักเรียน

สัปดาห์ที่	วัน	แผนการจัดการเรียนรู้	พฤติกรรม
1	จันทร์	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 1 การเขียนอัตราส่วนให้อยู่ในรูปร้อยละ	นักเรียนสามารถเปลี่ยนอัตราส่วนให้อยู่ในรูปร้อยละได้
	พุธ	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 2 การเขียนร้อยละให้อยู่ในรูปอัตราส่วน	นักเรียนสามารถเปลี่ยนร้อยละให้อยู่ในรูปอัตราส่วนได้
	พฤหัสบดี	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 3 การคำนวณเกี่ยวกับร้อยละ	นักเรียนสามารถคำนวณเกี่ยวกับร้อยละได้
2	จันทร์	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 4 การแก้โจทย์ปัญหาร้อยละ	นักเรียนสามารถแก้โจทย์ปัญหาร้อยละได้
	พุธ	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 5 การแก้โจทย์ปัญหาร้อยละ	นักเรียนสามารถแก้โจทย์ปัญหาร้อยละได้
	พฤหัสบดี	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 6 การแก้โจทย์ปัญหาเกี่ยวกับดอกเบี้ยคงต้นและดอกเบี้ยทบต้น	นักเรียนสามารถคำนวณดอกเบี้ยคงต้นและดอกเบี้ยทบต้นได้
3	จันทร์	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 7 การแก้โจทย์ปัญหาเกี่ยวกับราคาขาย ราคาซื้อ กำไรและขาดทุน	นักเรียนสามารถคำนวณราคาขาย ราคาซื้อ กำไรและขาดทุนได้

4.3 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบความรู้ เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ หลังการจัดการเรียนรู้ตามแผนการจัดการเรียนรู้ โดยใช้กิจกรรมการเรียนรู้แบบร่วมมือ STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL และการใช้คำถามชุดเดียวกันกับที่ใช้การจัดการเรียนรู้ก่อนการทดลอง โดยใช้กิจกรรมการเรียนรู้แบบร่วมมือ STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL และการใช้คำถามโดยผู้วิจัยเป็นผู้ทำการทดสอบวัดความรู้ เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ

4.4 เปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้

5. การวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยได้ประมวลผลข้อมูลดังนี้

5.1 วิเคราะห์ผลลัพธ์ของทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL โดยใช้ค่าเฉลี่ยและร้อยละของคะแนนเฉลี่ย

5.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL โดยใช้สถิติการทดสอบค่าทีแบบตัวอย่างไม่อิสระต่อกัน (t – test for dependent for samples)

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้เป็น 2 ประเด็น ดังนี้

1. การศึกษาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL ซึ่งแสดงคะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ที่ได้จากการทดสอบก่อนและหลังการใช้แบบฝึกทักษะ มีค่าสถิติพื้นฐาน คือ คะแนนเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าร้อยละของคะแนนเฉลี่ย ดังปรากฏในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าร้อยละของคะแนนเฉลี่ยของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

จำนวนนักเรียนที่เป็นกลุ่มตัวอย่าง 39 คน	ก่อนการจัดการเรียนรู้ (20 คะแนน)	หลังการจัดการเรียนรู้ (20 คะแนน)	คะแนนที่เพิ่มขึ้น
ค่าเฉลี่ย	6.74	13.97	7.23
S.D.	1.76	1.06	2.05
ร้อยละของคะแนนเฉลี่ย	33.7	69.85	36.15

เมื่อนักเรียนผ่านกระบวนการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL แล้วทำการวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 13.97 คิดเป็นร้อยละ 69.85 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.06 ซึ่งคะแนนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 36.15% จากก่อนการจัดการเรียนรู้

2. การเปรียบเทียบทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL เป็นการนำคะแนนที่ได้จากการวัดทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้ มาหาผลต่าง โดยใช้สถิติในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียน คือ t-test (Dependent for Samples) ซึ่งผลวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนจากการวัดทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่อง อัตราส่วนและร้อยละ ก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL

ผลสัมฤทธิ์	จำนวน (คน)	$\bar{x}$	S.D.	$\sum D$	$\sum D^2$	t
ก่อนเรียน	39	6.74	1.76	282	2,282	17.86*
หลังเรียน	39	13.97	1.06			

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

จากตารางที่ 3 พบว่า ทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ หลังการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDLของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 สูงกว่าก่อนการจัดการเรียนรู้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 หลังเรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL มีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 13.97 คิดเป็นร้อยละ 69.85 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.06 ซึ่งคะแนนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 36.15% จากก่อนการจัดการเรียนรู้ ซึ่งเป็นผลมาจากการสอนแบบเทคนิค KWDL นั้นเน้นการเรียนการสอนที่เป็นขั้นตอนซึ่งมี 4 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นที่ 1 K (What we know) นักเรียนรู้อะไรบ้างจากโจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ขั้นที่ 2 W (What we want to know) นักเรียนหาสิ่งที่โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ต้องการทราบ ขั้นที่ 3 D (What we do to find out) นักเรียนหาวิธีการให้ได้มาซึ่งคำตอบของโจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ขั้นที่ 4 L (What we learned) นักเรียนสรุปสิ่งที่ได้จากโจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ และได้ใช้เทคนิค

การเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD เป็นการจัดกิจกรรมการเรียนการสอน ซึ่งกำหนดให้นักเรียนที่มีความสามารถแตกต่างกัน ทำงานร่วมกันเป็นกลุ่มๆ ทำให้นักเรียนที่เรียนเก่งได้มีโอกาสช่วยนักเรียนที่เรียนอ่อน และนักเรียนที่เรียนปานกลางก็คอยช่วยเสริมและแลกเปลี่ยนความรู้กับกลุ่มเรียนเก่งและเรียนอ่อน โดย Mudwan (2009) ที่ได้ศึกษาความสามารถในการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์ และความสามารถในการทำงานกลุ่ม ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 โดยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL พบว่า นักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL มีความสามารถในการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน โดยก่อนเรียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.13 หลังเรียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.2 จากคะแนนเต็ม 12 คะแนน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนก่อนเรียนเท่ากับ 1.54 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนหลังเรียนเท่ากับ 2.81 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sangsawang and Laisema (2017) ศึกษาผลการใช้การพัฒนาบทเรียนมัลติมีเดียออนไลน์แบบสถานการณ์จำลองร่วมกับเทคนิค KWDL ที่มีผลต่อความสามารถในการแก้โจทย์ปัญหาคณิตศาสตร์ ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนวัดไร่ขิง พบว่าผลการประเมินความสามารถในการแก้โจทย์ปัญหาคณิตศาสตร์ที่เรียนด้วยบทเรียนมัลติมีเดียออนไลน์แบบสถานการณ์จำลองร่วมกับเทคนิค KWDL เรื่องโจทย์ปัญหาเกี่ยวกับเงินของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 3 หลังเรียน พบว่าความสามารถในการแก้โจทย์ปัญหาคณิตศาสตร์ของนักเรียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 เมื่อเทียบกับเกณฑ์อยู่ในเกณฑ์ดี

2. ผลการเปรียบเทียบคะแนนทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 2 ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL พบว่า นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 มีค่าเฉลี่ยก่อนการทดลองเท่ากับ 6.74 คะแนน และค่าเฉลี่ยหลังการทดลองเท่ากับ 13.97 คะแนน และมีทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 หลังใช้การจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL สูงกว่าก่อนใช้การจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ทั้งนี้เนื่องจากการจัดกระบวนการเรียนรู้โดยใช้การจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL มีลักษณะการจัดกระบวนการเรียนรู้ที่แบ่งกลุ่มคละความสามารถในการเรียน ทำให้นักเรียนในกลุ่มได้แลกเปลี่ยนเรียนรู้ซึ่งกันและกัน ส่งผลให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถแก้ไขโจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละอย่างเป็นขั้นตอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisuantang (2013) ได้ศึกษาการพัฒนาผลการเรียนรู้เรื่องโจทย์ปัญหาระคนของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 ที่จัดการเรียนรู้โดยใช้สมองเป็นฐาน (BBL) ร่วมกับเทคนิค KWDL ซึ่งพบว่าผลการเรียนรู้เรื่องโจทย์ปัญหาระคน ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้โดยใช้สมองเป็นฐาน ร่วมกับเทคนิค KWDL แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยมีคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าคะแนนก่อนเรียน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pengjan, Tanachaikhan and Panyapreuk (2017) ได้จัดการเรียนรู้โดยใช้เทคนิค KWDL เพื่อพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนคณิตศาสตร์ เรื่องโจทย์ปัญหาของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 ซึ่งนักเรียนที่เรียนด้วยเทคนิค KWDL มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

สรุปผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 หลังเรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL มีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 13.97 คิดเป็นร้อยละ 69.85 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.06 ซึ่งคะแนนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 36.15%

2. ผลสัมฤทธิ์ของทักษะการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ หลังการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 สูงกว่าก่อนการจัดการเรียนรู้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาและเปรียบเทียบทักษะในการแก้โจทย์ปัญหา เรื่องอัตราส่วนและร้อยละ ที่สอนโดยใช้การเรียนรู้แบบร่วมมือด้วยเทคนิค STAD ร่วมกับเทคนิค KWDL กับวิธีการสอนอื่น ๆ

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

2. ควรแจ้งคะแนนในการทำใบงานหลังเรียนทุกครั้งเพื่อเป็นข้อมูลย้อนกลับให้นักเรียนรู้ถึงพัฒนาการของตน พร้อมกับช่วยเสริมแรงให้นักเรียนมีความกระตือรือร้นในการเรียนมากขึ้น

3. ควรมีการสร้างนวัตกรรมหลากหลายชนิด เช่น บทเรียนสำเร็จรูป ชุดการสอนหนังสืออ่านประกอบ หรือสื่อที่ใช้กับสื่อเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น คอมพิวเตอร์ช่วยสอน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

Eisenmann, P. Novotná, J. Přibyl, J. and Břehovský, J. (2015). The development of a culture of problem solving with secondary students through heuristic strategies. **Mathematics Education Research Journal**, 27, 535-562.

Ministry of Education, Thailand. (2010). **Basic education core curriculum B.E. 2551 (A.D. 2008)** (in Thai). Bangkok: The Agricultural Co-operative Federation of Thailand Ltd.

Mudwan, C. (2009). A study of mathematics problem-solving abilities and group process abilities of primary grae-5 students taught by STAD teaching technique together with KWDL teaching technique (in Thai). **Master's Thesis of Education in Curriculum and Instruction**. Songkhla: Thaksin University.

Ogle, D. M. (1986). K-W-L: A teaching model that develops active reading of expository text. **Reading Teacher**, *39*(6), 564-570.

Pengjan, C., Tanachaikhan, N. and Panyapreuk, S. (2017). The learning management by using KWLD technique to develop learning achievement in mathematics entitle "sentence problems" of Prathomsuksa 6 students (in Thai). **Journal of Graduate Research**, 8(1), 71-82.

Salae, S, Pakapongpun, A. and Dokchan, R. (2018). The effect of using learning management KWDL technique on measures of central value for Mathayomsuksa 5 student's mathematics learning achievement and communication abilities (in Thai). **Journal of Education Naresuan University**, 20(4), 35-44.

Sangsawang, P. and Laisema, S. (2017). The development of simulation multimedia online lesson together with kwdl technique towards mathematical problems solving ability of Prathomsuksa 3 students Watraikhing (Sunthornutis) School (in Thai). **Veridian E-Journal, Silpakorn University: Humanities, Social Science and Arts (Thai edition)**, 10(2), 2250-2266.

Shinno, B. and Sriprom, M. (2014). Development of The STAD cooperative learning in conjunction with the mathematical modelling affecting mathematical problem solving abilities, teamwork behaviors, and attitudes toward mathematics of Mathayom Suksa 4 students (in Thai). **Graduate Studies Journal**, 11(52), 75-88.

Someprayoon, W. (1998). **Research and development of instructional model and instruction media in mathematics** (in Thai). Bangkok: Faculty of Education, Srinakharinwirot University.

Srisuantang, A. (2013). The development of learning outcomes on mix-problems of fourth grade students taught by brain-based learning (BBL) together with KWDL technique. **Veridian E-Journal, Silpakorn University: Humanities & Social Science and Science (Thai edition)**, 6(2), 223-236.

ดัชนีผู้เขียน (Author Index)

ชื่อ-สกุล	หน้า	Name-Surname	Page
ช่อทิพย์ กัณฑโชติ	102	Chortip Kantachot	103
นงค์เยาว์ นนทวงษ์	90	Nongyao Nontawong	91
ปิยะดา ลื่นกลาง	145	Piyada Luenkland	146
พรพิทักษ์ เห็มบาสัตย์	145	Ponpitak Hembasat	146
พัชรี วงษาสนธิ์	127, 137	Patcharee Wongsason	128, 138
มะลิวรรณ อมตธงไชย	90	Maliwan Amatatongchai	91
วรรณพล พิมพะสาลี	145	Wannapol Pimpasalee	146
วรางคณา วังคะฮาด	116	Warangkana Wangkahad	117
วิภาดา สุวรรณไตรย์	116	Wipada Suwannatrai	117
วุฒิชัย พรมวงศ์	116	Wuttichai Promwong	117
สุพจน์ สีบุตร	127, 137	Supot Seebut	128, 138
อ้อฤทัย ใจบุญ	116	Oruethai Jaiboon	117
อำภาภรณ์ สุดโททอง	102	Ampaporn Sudtotong	103



มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา (JSSE)

งานส่งเสริมการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ถนนสถลมาร์ค ตำบลเมืองศรีไค อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

โทรศัพท์ 045-353401 ต่อ 4425 โทรสาร 045-353422

Email : jsse.sci.ubu@gmail.com, saksri.s@ubu.ac.th, sura.w@ubu.ac.th

วันที่พิมพ์ 30 ธันวาคม 2562